KFAS
مؤسسة الكويت للتقدم العلمي
Kuwait Foundation for the Advancement of Sciences

بيتر وورد و جو كيرشفينك

تاريخ جديد للحياة

الاكتشافات الجديدة الجذرية
حول أصول الحياة على الأرض وتطورها

ترجمة
د. يوسف أحمد بركات

BLOOMSBURY



تاريخ جديد للحياة/ بيتر وورد و جو كيرشفينك، ترجمة د. يوسف أحمد بركات -
المراجعة العلمية د. نزار محمود أبازيد ط١ -
الكويت: مؤسسة الكويت للتقدم العلمي

ISBN: 978-99966-33-75-1

A New History of Life

هذا الكتاب المترجم يعبر عن وجهة نظر المؤلف ودار النشر، ولا تتحمل مؤسسة الكويت للتقدم العلمي أي مسؤولية أو تبعات عن مضمون الكتاب.



صاحب السمو الشيخ صباح الأحمد الجابر الصباح

أمير دولة الكويت



سمو الشيخ نواف الأحمد الجابر الصباح

ولي عهد دولة الكويت

إهـــداء

من بيتر وورد: إلى د. هوارد ليونارد و د. بيتر شاليت مؤرخي الحياة وإلى روبرت بيرنر العظيم، جامعة ييل.

من جو كيرشفينك: إلى روح د. يوجين ميرل شوميكر، د. هاينتز أدولف لوفينشتام، د. كلير كاميرون باترسون من معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا.

لقد ترك هؤلاء وآخرون بصماتهم على كامل عقلي.

المحتويات

مقدمة	13
1. معرفة الوقت	21
2. التحول إلى كوكب شبيه بالأرض: ما بين 4.6 - 4.5 بليون سنة	27
3. الحياة والموت والحيز المكتشف حديثاً بينهما	41
4. تشكل الحياة: ما بين 4.2 - 3.5 بليون سنة مضت	57
5. من المنشأ إلى الأكسجة: ما بين 3.5 - 2.0 بليون سنة مضت	79
6. الدرب الطويل إلى الحيوانات: ما بين 2.0 - 1.0 بليون سنة مضت	103
7. العصر الكريوجيني وتطور الحيوانات: ما بين 850 - 635 مليون سنة مضت	113
8. الانفجار الكامبري: قبل ما بين 600 - 500 مليون سنة مضت	133
9. تشعّب الحيوانات الأوردفيشي الديفوني: ما بين 500 - 360 مليون سنة مضت	161
10. تيكتاليك وغزو اليابسة: ما بين 475 - 300 مليون سنة مضت	179
11. عصر مفصليات الأرجل: ما بين 350 - 300 مليون سنة مضت	203
12. الاندثار العظيم: نقص الأكسجين والركود العالمي: ما بين 252 - 250 مليون سنة مضت	225
13. الانفجار الترياسي: ما بين 252 - 200 مليون سنة مضت	239
14. هيمنة الديناصورات في عالم منخفض الأكسجين: ما بين 230 - 180 مليون سنة مضت	259
15. محيطات الدفيئة: ما بين 200 - 65 مليون سنة مضت	293
16. موت الديناصورات: قبل 65 مليون سنة	311
17. عصر الثدييات الثالث الذي تأخر كثيراً: ما بين 65 - 50 مليون سنة مضت	323
18. عصر الطيور: ما بين 50 حتى 2.5 مليون سنة مضت	335
19. البشرية والانقراض العاشر: من 2.5 مليون سنة حتى الآن	345
20. ما يمكن معرفته عن مستقبل الحياة على الأرض	361
الملاحظات	373

مقدمة

قد يكون التاريخُ بكل أشكاله تقريباً المادةَ التعليمية التي يكرهها التلاميذ أكثر من أي مادة أخرى. وقد أجرى جيمس لوفن واحداً من أعمق التحليلات في كتابه الأكاذيب التي قالها لي المعلمون *Lies my teacher told me*.[1] ويمكن تلخيص استنتاجه بكلمة واحدة: «لاعلاقية»، أي غياب العلاقة بالحياة. ويكتب لوفن: «القصص التي ترويها كتب التاريخ مبتذلة، فكل مشكلة إما محلولة أو تكاد تكون محلولة... لا يستخدم المؤلفون الحاضر لتوضيح الماضي إلا نادراً، فالحاضر ليس مصدراً للمعلومات بالنسبة إلى كاتبي النصوص التاريخية.»

رسالة لوفن واضحة تماماً. إن طريقة تدريس التاريخ الأمريكي في المدارس الثانوية في أيامنا تجعل المرء يستنتج أن الماضي منفصل عن الحاضر، فلا تأثير للتاريخ في حياتنا اليومية المعاصرة ولا علاقة له بها. ولكن هذا الاستنتاج خطأ تماماً، ولاسيما فيما يتعلق بتاريخ الحياة، القديم لدرجة أنه مدوَّن في الصخور والجزيئات والنماذج وعلى سلاسل الحمض النووي DNA الموجودة في كل خلية. وعلاقة هذا التاريخ بنا هي أنه يعطينا مكانةً وسياقاً؛ كما أن تاريخ الحياة قد ينقذنا من الانقراض على المدى القريب، لو قرأناه وفهمناه واعتبرنا من إنذاراته.

وفي بدايات ستينات القرن العشرين كتب الأديب الأمريكي العظيم جيمس بولدوين: «الناس محبوسون في التاريخ، والتاريخ محبوسٌ فيهم».[2] فقد كتب هذا الكلام وهو يقصد الأعراق، لكن هذه العبارة تبقى صحيحةً تماماً لو استعضنا عن كلمة «الناس» بعبارة «كل الحياة على الأرض في الحاضر والماضي»، لأن كل سلسلة من الحمض النووي في كل خلية من خلايانا سجلٌ عريق لتاريخ الحياة مكتوبة برموز بسيطة ومنقولة من جيل إلى جيل. ويمكن القول إن الحمض النووي DNA ليس إلا تاريخاً، التاريخَ ذا التظاهرات الطبيعية الذي خلطته وراكمته عبر العصور التي لا تحصي الظاهرةُ الأقل رحمة بين كل الظواهر: الانتخاب الطبيعي Natural Selection. فالحمض النووي DNA هو التاريخ الذي بداخلنا، وهو في الوقت عينه حاكمنا، مخطط أجسامنا وآمر ما سننقله إلى أولادنا، الهبات التي قد تكون نعماً أو قنابل موقوتة فتاكة. وإننا لحقّاً محبوسون في مركبة التاريخ هذه، وهي محبوسة فينا بالقدر نفسه.

يعطينا تاريخُ الحياة الأجوبةَ عن تلك الأسئلة المعقدة التي تواجهنا جميعاً: كيف حصل أننا - نحن البشر - نسكن هذا الغصين الدقيق المتأخر والهامشي جداً عن شجرة الحياة العملاقة؟ ما هي الحروب التي اضطر نوعنا الحيوي إلى خوضها؟ ما هي المصائب التي تركت آثارها في غصين البشر من شجرة الحياة البالغ عمرها أربعة بلايين سنة؟ وقد يساعدنا الماضي على إدراك مكانتنا بين العشرين مليون نوع أو أكثر من الأنواع التي تعيش الآن وبين بلايين لا تحصى من الأنواع المنقرضة. وعندما لا يعود النوع موجوداً، يندثر معه مستقبل تطوُّرٍ لم يتحقق لأنواعٍ حيةٍ لا تحصى.

وفي الصفحات المقبلة نتأمل الطريق الطويل إلى حاضرنا وإلى التجارب الغابرة التي مرّ بها أجدادنا الأوّلون: النار، والجليد، وضربات المطارق من الفضاء، والغازات السامة، وأنياب الوحوش، والتزاحم بلا رحمة، والإشعاعات القاتلة، والمجاعات، والتغيرات الهائلة في الموئل، ووقائع الحرب، والغزو وسط الاستعمار القاسي لكل بقعة صالحة للحياة على هذا الكوكب، وكل واقعة تركت علاماتها في إجمالي مجموع الحمض النووي DNA الموجود الآن. وقد كانت كل أزمة وكل غزو بوتقةً غيّرت الجينومات بإضافة كل ضروب الجينات أو حذفها، وكل واحد منا خلفٌ للناجين الذين عركتهم الكوارث وأخمدهم الزمن.

وهناك سببٌ آخر، وقد يكون أعظم، يدعو إلى الاهتمام بتاريخ الحياة، وهذا السببُ موجزٌ في الاقتباس التالي من نورمان كازينس: «التاريخ نظام ضخم للإنذار المبكر».[3] وتعود هذه الحكمة إلى أيام اقتراب نهاية الحرب الباردة. فالأجيال الناشئة من البشر لا تكاد تتصور الكيفية التي كنا نكبر بها في الخمسينات والستينات من القرن العشرين، عندما كانت صفارات الإنذار الأسبوعية تذكِّرنا نحن - أولاد الزمن المظلم - أن نهاية العالم لا تفصلها عنا سوى صرخة صفارة الإنذار، وأن أي صوت خافت لطائرة نفاثة في آخر الليل قد يكون بداية النهاية.

إن حروب البشر فرضت ضريبةً فظيعة على البشرية مرة وراء أخرى، أبد الآبدين، من الناحية البدنية والاقتصادية والانفعالية. وهناك أوجه شبه لا شك فيها بين تاريخ الحياة وبين النزاعات والحروب عند البشر. والنماء بفعل التطور المشترك The Coevolutionary development لأسلحة الهجوم عند الحيوانات المفترسة (تحسين المخالب والأسنان والهجوم بالغازات، وحتى الأشواك المدهونة بالسموم للإمساك بأنواع الفرائس وقتلها)، أدى إلى تدابير عكسية سريعة أيضاً عند فرائس الحيوانات المفترسة، بما في ذلك تحسين الدروع والسرعة والقدرة على الاختفاء، وأحياناً الأسلحة الدفاعية أيضاً،

ويسمى كل هذا تقنياً سباق التسلح البيولوجي. وكثير من الأحداث العظيمة للتطور لا يمكن أن يتكرر؛ فقد كان لدى التطور الوقتُ الطويلُ ليملأ الغلاف الحيوي (البيوسفير Biosphere) بكائنات ذات قدرة تنافسية عالية وفعالية هائلة؛ مما يستبعد أن يتكرر، على سبيل المثال، الانفجار الكامبري حين ظهرت جميع مخططات الأجسام الأساسية للحيوانات. ولكن ما يمكن أن يتكرر هو الأمور المضادة للعيش والتنوع، أي الانقراض أو الانقراض العظيم: الكوارث الماضية الفظيعة في الأزمنة الغابرة، الانقراضات الجماعية.

ومع كل جزيء ثاني أكسيد الكربون ننفثها في الغلاف الجوي نتجاهل صفارات الإنذار المبكر بأن الارتفاعات السريعة في ثاني أكسيد الكربون هي العامل المشترك بين أكثر من عشرة انقراضاتٍ جماعية في الماضي الغابر وبين ما يحدث اليوم. فتلك الانقراضات لم تكن ناجمة عن اصطدام كويكبات، بل عن زيادات سريعة في غازات الدفيئة الجوية الناتجة من البراكين والاحترار (ارتفاع الحرارة) العالمي الذي حصل نتيجة لذلك. وقد ظهر في هذا القرن نهج جديد رهيب للانقراضات الجماعية: «الانقراضات الجماعية بفعل غازات الدفيئة»، وهي تسمية مختارة خصيصاً لوصف سبب اندثار الأغلبية الساحقة من الأنواع الحية خلال الانقراضات الجماعية في الماضي.[4]

وهناك أدلة صارخة من شتى أنواع المعطيات حول زمن حدوث هذه الانقراضات بغازات الدفيئة ومكانه وكيفيته. ومن يسمع صفارات الإنذار يشعر بأن الخطر حقيقي بما فيه الكفاية. ولكن ما أكثر من يتجاهلون أو يتغاضون عن عِبَر الماضي التي لا تُحصى، والتي قد تكون مستقبلنا نحن. ويقدم تاريخ الحياة نظامَ إنذارٍ مبكر ينذرنا بأن علينا أن نخفض انطلاق غازات الدفيئة بشرية المنشأ، لكن تاريخ البشر يخبرنا بأننا على الأغلب لن نكترث بالإنذارات ولن نتراجع عن الأذى حتى تقع سلسلة من الوفيات الجماعية البشرية الناجمة عن المناخ فلا تترك لنا خياراً آخر.

إن المعلومات العلمية مما يسمى الماضي السحيق هي الجانب المنفرد الذي يعاني أكبر تجاهل خلال الجدال حول تغير المناخ. فقد كتب جورج سانتايانا قولاً مأثوراً عن التاريخ يكاد يصبح مبتذلاً من كثرة الاستشهاد به: «أولئك الذين يتجاهلون التاريخ محكومون بتكرُّره».[5] وفيما يتعلق بالتاريخ الواضح للانقراضات الجماعية الناجمة عن مستويات ثاني أكسيد الكربون في الجو التي نقترب بسرعة نحو الوصول إليها في المستقبل القريب، يجب أن نولي انتباهاً خاصاً لأهم كلمة في نبوءة سانتايانا، وهي كلمة «محكومون».

ما الجديد في «تاريخ جديد للحياة» هذا؟

لا يمكن أن يعطي أيُّ كتابٍ تاريخَ الحياة حقه. وينبغي دائماً الاختيار، وكان اختيارنا يُملى بتوجهنا حول كلمة «الجديد». فقد صدر آخر تاريخ «كامل» للحياة في مجلد واحد في منتصف تسعينات القرن العشرين: الكتاب الرائع والرائج الحياة: التاريخ الطبيعي للبلايين الأربعة الأولى للحياة على الأرض[6] *Life: A natural history of the first four billion years of life on Earth* بقلم عالم الأحافير والكاتب العلمي ريتشارد فورتي. وكانت مقارباته رائعة، ولا تزال قراءة الكتاب، أو في حالتنا إعادة قراءته، ممتعة جدا بعد مضي أكثر من عشرين سنة على صدوره. ولكن بسبب السرعة الرهيبة في تقدُّم العلوم هناك كثير مما كان مجهولاً حينها مقارنةً بما هو موجود حاليا، بل إنه ظهر مجالان علميان جديدان لم يكد يكن لهما وجود في منتصف تسعينات القرن العشرين وهما: البيولوجيا الفلكية (الأستروبيولوجيا Astrobiology)، والبيولوجيا الأرضية (الجيوبيولوجيا Geobiology). وأدى التقدم في التجهيزات إلى فهم جديد تماماً، واكتُشِفت بروزاتٍ لطبقات تحوي أحافير (أحافير) من أزمنة أو أصناف مجهولة سابقاً. وحتى سوسيولوجيا تنفيذ العلوم قد تغيرت، فمن المعترف به أنه في أيامنا تحدث أهم الاكتشافات العلمية بين حدود المناهج المعتادة والمهيبة في السابق، مثل: الجيولوجيا والفلك وعلم الأحافير والكيمياء وعلم الوراثة والفيزياء وعلم الحيوان وعلم النبات، وكل واحد منها كان منعزلاً، وكان يرمز إلى ذلك بأن كل واحد منها يقع ضمن مبنىً منفصل في أغلب الجامعات، ولكل منها ليس هيئة علمية ذات قواعد وحدود فقط، بل مجالات كاملة لكل منها قواميسها وطرقها المفضلة لنشر المعلومات البحثية.

لقد استخدمنا ثلاثة محاور في الصفحات المقبلة لتكون نقاط جذب للتاريخ الذي قررنا استعراضه. أولاً، نفترض أن تاريخ الحياة قد تأثر بالكوارث أكثر من جميع القوى الأخرى مجتمعةً، بما فيها التطور التدريجي البطيء الذي اكتشفه أولاً تشارلز داروين بناء على ما تعلّمه من كبار معلمي نظرية الوتيرة الواحدة Uniformitarianism. ومبدأ الوتيرة الواحدة هذا، وهو المبدأ الأساسي للجيولوجيا على مدى أكثر من قرنين، طوره جيمس هاتن وتشارلز لايل في نهاية القرن الثامن عشر.[7] وكان يُلقَّن فأصبح المؤثر العلمي العلمي الأولي في أجيال من علماء العلوم الطبيعية الشباب، بمن فيهم تشارلز داروين.[8] وقد أطلق اكتشاف الكويكب الذي اصطدم بكوكبنا وأدى إلى فناء الديناصورات منذ 65 مليون سنة بدايةً هذه النقلة النوعية نحو ما يسمى أحياناً بالكارثية الجديدة،[9] إشارة إلى النظرية الكارثية Catastrophism، وهي النهج الذي سبق نهج الوتيرة الواحدة.

وسنبين في كتابنا هذا أن مبدأ الوتيرة الواحدة في تطبيقه على العوالم الغابرة وعلى منوال التطور ووتيرته قد بَطُل ودُحض إلى حد بعيد. فالعالم المعاصر ليس الأداة المثلى لشرح شتى الأزمنة والأحداث التي وقعت في الماضي السحيق، والتي كانت مفاجئة حقاً لا تدريجية. مثلاً، لا توجد أمثلة معاصرة لتوضيح «أرض كرة الثلج» أو «حدث الأكسجة العظيم» أو «محيطات كانفيلد» الغنية بالكبريت التي استمرت أكثر من بليون سنة، وطوال كل ذاك الوقت بقيت تعرقل وصول التطور الأول إلى مستوى تعقيد الحيوانات. وحتى الانقراض الجماعي الطباشيري الثلاثي الذي يرمز إليه بالرمز K-T، والذي قتل الديناصورات (ويسمى حالياً K-Pg، أي العصر الطباشيري الباليوجيني، لكننا نأمل بأن زملاءنا لن يعتبوا علينا إذا التزمنا بمصطلح K-T لأنه أشهر وأكثر سلاسة) لا يضاهيه شيء اليوم؛ ولا نوع الجو والمحيط الذي سمح بتشكل الحياة على الأرض أو الغلاف الجوي ذي مستويات ثاني أكسيد الكربون العالية، لدرجة أنه لم يكن هناك كسرة جليد في أي مكان على كوكبنا. إن الحاضر ليس مفتاحاً لأغلب الماضي، بل في الواقع إنه ليس مفتاحاً إلا للبليستوسين Pleistocene، وهذا ما حدّ من رؤيتنا وفهمنا وإدراكنا.

ثانياً، وعلى الرغم من أننا قد نكون حياة مبنية على الكربون ونتشكل من جزيئات الكربون ذات السلاسل الطويلة (ذرات الكربون ترتبط ببعضها لتشكل البروتينات)، فالتأثير الأعظم في تاريخ الحياة كان لثلاثة جزيئات مختلفة، وهي جزيئات بسيطة على شكل غازات: الأكسجين وثاني أكسيد الكربون وكبريتيد الهيدروجين. وفي الواقع، قد يكون الكبريت المؤثر المنفرد الأعظم بين جميع العناصر في فرض طبيعة الحياة وتاريخها على هذا الكوكب.

وأخيراً، وعلى الرغم من أنّ تاريخ الحياة مسكونٌ بالأنواع الحية، فإن العامل المؤثر الأكبر للوصول إلى تشكيلة الحياة المعاصرة كان تطور النظم البيئية. فالشعاب المرجانية والغابات الاستوائية حيوانات (وحيش) Fauna النفاثات الحرارية المائية في أعماق البحار وغيرها كثير، يمكن اعتبارها كلها مسرحية بممثلين مختلفين والسيناريو نفسه عبر الأزمنة. لكننا نعرف أنه من حين إلى آخر ظهرت في الماضي الغابر نظم بيئية جديدة تماماً تسكنها أشكال حياة جديدة؛ فظهور الحياة التي تستطيع الطيران مثلاً أو الحياة التي تستطيع السباحة أو المشي، كل حدث من هذه الأحداث كان تغيراً عظيماً في الابتكار التطوري غيّر العالم، وساهم في كل حالة في خلق شكل جديد من النُّظم البيئية.

مساهمتنا

تؤثر خلفية المؤلفين في التحيزات المتأصلة في أي تاريخ مكتوب. بيتر وورد هو عالم الأحياء القديمة منذ عام 1973، ولديه منشورات كثيرة حول رأسيات الأرجل المعاصرة والقديمة إضافة إلى الانقراضات الجماعية للفقاريات واللافقاريات. أما جوزيف كيرشفينك؛ فهو بيولوجي جيوفيزيائي بدأ عمله على الانتقال ما بين ما قبل الكامبري والكامبري، ثم توسّعت اهتماماته في الأبحاث إلى الأزمنة الأقدم (حدث الأكسجة العظيم)، وهو أيضاً مُكتشف أراضي كرة الثلج، وهي أجزاء مهمة في تاريخ الحياة. ولاحقاً عملنا معاً على الانقراضات الديفوني والبرمي والترياسي الجوراسي والطباشيري الثالثي (وهذه الفترة الزمنية تغيرت تسميتها مؤخراً إلى الباليوجين).

لقد عملنا معاً في الميدان منذ منتصف تسعينات القرن العشرين، وتضمنت رحلاتنا الميدانية: دراسةَ الانقراض الجماعي البرمي في جنوب إفريقيا من 1997 حتى 2001، ودراسةَ أمونيت الطباشيري الأعلى في باخا كاليفورنيا بكاليفورنيا وإقليم جزيرة فانكوفر، ودراسة الانقراض الجماعي الترياسي-الجوراسي في جزر الملكة شارلوت، ودراسة الانقراض الجماعي الطباشيري الثالثي (K-T) في تونس وجزيرة فانكوفر وكاليفورنيا والمكسيك وأنتاركتيكا، ودراسة الانقراض الجماعي الديفوني في غرب أستراليا.

ومن المفترض أن يكون صوتنا في هذا الكتاب ثنائياً متناغماً، لكن فيه مقاطع عندما يبرز واحدٌ منا أو الآخر بسبب وثاقة صلة الموضوعات باهتمام معين لنا، أو لأننا كنا جزءاً لا يتجزأ من تاريخ إحدى نواحي العلم التي نتحدث عنها.

الأسماء والمصطلحات

لقد ذكرنا أن تعداد الأنواع الحية على الأرض بالملايين. ويقرّ أغلب من يدرسون الحياة أن العدد الحالي للأنواع المعرَّفة رسمياً (ما يتطلب اسماً لكل من الجنس والنوع) لا يتجاوز على الأغلب عشرة في المئة من العدد الفعلي للأنواع التي تعيش في الوقت الراهن[10] ولكن كم هو عدد جميع الأنواع في الماضي؟ بلايين بالتأكيد. وهذا يجعل كتابة تاريخها مهمة شاقة. فلكل من علم الأحافير والبيولوجيا والجيولوجيا قواميس كاملة من رطانات المصطلحات المميزة والخاصة، ومهمتنا هي استخدام اللغة الإنجليزية بأسلوب مفهوم لإيصال معنى هذه المصطلحات الغريبة الطويلة (أو - في حالة **ناسا** - تفسير

اختصاراتها التي لا تحصى). والأصعب من ذلك أننا مضطرون إلى إدخال كثير من الأسماء اللاتينية للعديد من الكائنات الكبيرة والصغيرة التي خلقت تاريخ الحياة على الأرض ولا تزال تعمل على استمراره يوماً بعد يوم.

وأخيراً، تأتي في آخر الكتاب كلمة الشكر إلى العدد الهائل من الأشخاص الذين ساعدونا في دربنا لإنجاز هذا الكتاب. إلا أن وورد يحب أن يعبر عن امتنانه لكاتبين علميين كان لهما الأثر الأعمق عليه: روبرت بيرنر، فأبحاثه حول الأكسجين وثاني أكسيد الكربون أساسية في العمل الذي نضعه بين أيدي القراء؛ ونك لين العالم والكاتب المثمر الذي تمثل كتبه أوج الوضوح والبصيرة، والتي تركت أثراً عميقاً في واحد على الأقل من المؤلفين، والذي لا تزال كتبه رائدة وعصرية.[11]

1

معرفة الوقت

حتى وقت قريب كان المقياس الزمني في الجيولوجيا يتصف بالغموض، إذ لم يكن يقاس بالسنوات بل بالمواقع النسبية للصخور المتناثرة في أنحاء القشرة الأرضية. وسنتناول في هذا الفصل المقياس الزمني الجيولوجي، وهو الأداة المستخدمة في اكتشاف التتابع النسبي لتاريخ الحياة على الأرض.

المقياس الزمني الجيولوجي أداة غريبة بالية لاتزال متماسكة بفضل قواعد القرن التاسع عشر والشكلية الأوروبية الحالية. والأجيال الأحدث من الجيولوجيين لاتحب تلك السلسلة من الاصطلاحات العتيقة الخانقة المرتبطة بالمقياس الزمني، والتي لايزال يطالب بها حشد من الجيولوجيين المتشيخين أكثر فأكثر ممن درسوا وفق التقاليد القديمة. ولا يزال واجباً حتى يومنا هذا إقرار جميع التعديلات من قبل اللجان؛[1] ووحدات الزمن كلها يجب أن ترتبط بما يسمى «قطاع نموذجي» Type Section، أي طبقة حقيقية من صخور رسوبية اختيرت من أجل التمثيل الأفضل لقطاع زمني معين. ويفترض أن يكون القطاع النموذجي سهل الوصول ويجب ألا يكون قد تشوه نتيجة التكتونية أو التسخين أو التعقد «البنيوي» (كالصدوع والطيات وغيرها من العمليات المخادعة التي تخلط الطبقات الرسوبية الأفقية أصلاً). ويجب ألا يكون القطاع مقلوباً رأساً على عقب (الأمر الذي حدث أكثر مما قد يخطر على البال)، ويجب أن يحوي أحافير (مستحاثات) كثيرةً (عيانية ومجهرية)، كما يجب أن يكون فيه أيضاً شرائح أو أحافير أو معادن يمكن تأريخها بأعمار «مطلقة» (أي بالسنوات الفعلية) من خلال توليفةٍ بين التأريخ الإشعاعي أو دراسة مغناطيسية طبقات الأرض أو شكل من أشكال التأريخ بالنظائر المشعة (مثل تقدير عمر الطبقة بنظائر الكربون أو السترونشيوم Strontium).

إن المقياس الزمني معقد، وكثيراً ما يكون عديم الفائدة من حيث إنه لو قال أحدهم إن هذا الصخر عمره جوراسي، فهو يقول بالفعل إن الصخر المقصود من نفس عمر المقطع النموذجي المحدد للجوراسي، وهو في جبال جورا بأوروبا. ولكن هذه هي المادة التي نضطر نحن مؤرخو الأرض والحياة إلى العمل معها لاكتشاف عمر الصخور بواسطة الأحافير الموجودة فيها فضلاً عن إبلاغ الآخرين عن عمرها الفعلي. ومع أنه تتوفر أحياناً أدوات أحدث من

تاريخ الأحداث والأنواع بناءً على موضعها النسبي في تراكمات الصخور الرسوبية،[2] بما فيها تحديد العمر الفعلي للأحفورة باستخدام التأريخ بالنظائر المشعة كالاستخدام الشهير لنظير الكربون 14- أو أنواع أخرى للتأريخ الإشعاعي (الراديومتري) Radiometric dating بالاستفادة من معرفة سرعة تحلل شتى العناصر المحتواة في الصخر، فإنه في الحقيقة لا يوجد إلا القليل جداً من الأحافير في شرائح، أو نادراً ما تتكون من مواد تسمح بإجراء مثل هذا التأريخ للعمر المطلق. ولا يتوفر عادةً إلا المحتوى الأحفوري، ومنه يجب تأريخ الصخر.

لا يزال المقياس الزمني الجيولوجي أهم الأدوات في تأريخ جميع الصخور على الأرض (عند تصنيفها وفق عمرها لا وفق خصائصها الصخرية)، كما أنه الوسيلة التي تُؤرخ الأحداث في تاريخ الحياة بوساطتها. ويبقى المقياس الزمني، من خلال استخدامه للتسميات المعقدة وفترات زمنية تبدو عشوائية وغير متماثلة، أداةً من القرن التاسع عشر بامتياز، ويكمن سبب كونه معيقاً أكثر من كونه مفيداً في حالات كثيرة ليس في طريقة تطويره بالدرجة الأولى، إنما في الأسلوب البيروقراطي المتحجر لتدوينه وتشكيله الرسمي حتى وصل إلى ما نراه بين يدينا اليوم. ولم تُضف إليه «عصور» جيولوجية جديدة إلا في العقد الماضي. وتشكيل هذين العصرين الجديدين واستخدامهما العام أساسيان في فهمنا لتاريخ الحياة: العصر الكريوجيني Cryogenian، قبل ما بين 850 إلى 635 مليون سنة مضت، ويتبعه مباشرةً العصر الإدياكاري Ediacaran، قبل ما بين 635 إلى 542 مليون سنة مضت.

الوصول إلى نسخة 2015 للمقياس الزمني

كان النصف الأول للقرن الثامن عشر وقت ولادة مجال الجيولوجيا ووقت تأسيس المقياس الزمني الجيولوجي كما نعرفه حاليا، حيث تمّ خلال ذاك الوقت تحديد مختلف الحقب والفترات والعصور، وبذلك حل المقياس الجديد محل نظام أقدم.[3] وكان يُعتقَد قبل عام 1800 أن كل صخر يصادف على الأرض يتصف بعمر محدد؛ وكان يُفترَض أن الصخور النارية (البركانية) Igneous والصخور المتحولة Metamorphic التي تشكل لب جميع الجبال والبراكين هي الصخور الأقدم على الأرض، وكانت الصخور الرسوبية تُعتبَر أحدث، وهي نتيجة لسلسلة من الفيضانات التي تغطي كامل سطح الأرض. وبقي هذا المبدأ المسمى النبتونية Neptunism سائداً، بل تطور إلى مرحلة اعتُقِد فيها أن لكل نوعٍ من أنواع الصخور الرسوبية نفسها عمراً محدداً؛ مثلاً، فإن الطباشير الأبيض الذي

يبرز على الحدود الشمالية لشبه القارة الأوروبية ثم يستمر إلى آسيا، اعتُبِر كله من عمر واحد يختلف عن عمر الصخر الرملي، وذاك بدوره يختلف عن عمر الصخور الطينية والطفل ذات الحبيبات الأكثر نعومةً. ولكن في عام 1805 حدث اكتشاف غيّر كل شيء، فقد اكتشف ويليام سميث[4] الملقب Strata أن ما يحدد عمر أنواع الصخور ليس ترتيبها، بل ترتيب الأحافير ضمن الصخور نفسها هو الذي يمكن استخدامه لتأريخ الطبقات ثم ربطها بالمواضع البعيدة؛ وقد بيّن أن مختلف أنواع الصخور يمكن أن تكون ذات أعمار مختلفة كثيرة، وأن تعاقب الأحافير نفسه يمكن أن يشاهد في مواقع بعيدة عن بعضها.

الدهر	الحقبة	العصر	(بلايين السنين)
دهر البشائر	الحقبة الحديثة	نيوجين	0–23
		باليوجين	23–66
	الحقبة المتوسطة	طباشيري	66–145
		جوراسي	145–200
		ترياسي	200–252
	الحقبة القديمة	برمي	252–299
		كربوني	299–359
		ديفوني	359–416
		سيلوري	416–444
		أوردوفيكي	444–488
		كامبري	488–542
	الطلائع الحديثة	أدياكاري	542–635

الحقبة	العصر		(بلايين السنين)
ما قبل الكامبري	الطلائع الحديثة	إدياكاري	542–635
		كريوجيني	635–850
		توني	850–1000
	الطلائع الوسطى	استيني	1000–1200
		إكتاسي	1200–1400
		كاليمي	1400–1600
	الطلائع القديمة	ستاثيري	1600–1800
		أوروسيري	1800–2050
		رياسي	2050–2300
		سيديري	2300–2500
	السحيقة الحديثة		2500–2800
	السحيقة الوسطى		2800–3200
	السحيقة القديمة		3200–3600
	السحيقة الباكرة		3600–غير محدود
الجهنمي (الهاديان)			غير محدود–4567

(النسخة الحالية للسلم الزمني الجيولوجي.)

Felix M. Gradstein et al., "A New Geological Time Scale, with Special Reference to Precambrian and Neogene", Episodes 27, no. 2 (2004): 83100).

لقد فتح مبدأ تعاقب الحياة Faunal succession الباب أمام تشكيل المقياس الزمني بمعناه الحديث.[5] وكان مفتاحه هو الحياة، الحياة المحفوظة في الأحافير، وأمكن استخدام الفروق النسبية في محتويات الصخور من الأحافير لتمييز تعاقب الصخور على سطح الأرض. وكان التقسيم الأكبر هو الصخور الأقدم بلا أحافير تحت صخور شاع وجود الأحافير فيها. وسميت أقدم وحدة تحوي الأحافير بالكامبري Cambrian نسبةً إلى قبيلة ويلزية، ومن ثم عُرفت جميع الصخور الأقدم منها بصخور ما قبل الكامبري. وسميت الصخور التي تحوي الأحافير من الكامبري وما بعد بصخور البشائر (دهر الحياة الظاهرة) Phanerozoic، أي «زمن الحياة المرئية». ويتبع دهرُ الطلائع (الحياة المستترة/ طلائع الحياة) Proterozoic، وهو الأخير قبل تطور الحيوانات، الدهرين الأقدم وهما: الدهر السحيق (الأركي) Archean، والدهر الجهنمي (الهاديان) Hadean.

لقد حُدِّدت العصور في دهر البشائر (الحياة الظاهرة) بسرعة كبيرة، وكان ذلك بناءً على محتواها من الأحافير. وخلال بضعة عقود من الجمع والتصنيف و«مسك الدفاتر» للأحافير (أي تحديد الظهور الأول والأخير لمجموعات أحفورية معينة في السجل) تبين أن دهر البشائر (الحياة الظاهرة) يمكن تقسيمه إلى ثلاث مدد زمنية وتجمعات صخرية كبرى، وسميت المدة الأقدم بالباليوزويك Paleozoic era (أي حقبة الحياة القديمة، أو الحقبة الأولية)، والوسطى بالميزوزويك Mesozoic (الحقبة الوسطى)، والأحدث بالسينوزويك Cenozoic (الحقبة الحديثة).

وحتى قبل تحديد هذه الحقب كانت أغلب تسميات العصور المستخدمة اليوم موجودة بالفعل. وعلى الترتيب، كانت العصور الكامبري و الأوردفيشي (الأوردوفيكي) والسيلوري والديفوني والكربوني (هذا المصطلح أوروبي؛ ففي أمريكا الشمالية يُقسم الكربوني إلى العصرين الميسيسيبي والبنسيلفاني) والبرمي تشكل حقبة الحياة القديمة؛ والترياسي والجوراسي والطباشيري شكلت الحقبة الوسطى؛ والباليوجين والنيوجين (الحقبة الثالثة Tertiary سابقاً) والحقبة الرابعة Quaternary شكلت الحقبة الحديثة Cenozoic.

وبحلول عام 1850 كانت العصور قد استقرت ونادراً ما تمّ قبول عصور جديدة (مع أن كثيراً من الجيولوجيين في نهاية القرن التاسع عشر سعوا جاهدين

إلى شرف تحديد عصر كامل جديد، وفي ذلك الوقت لم يعد هذا ممكناً إلا على حساب ابتلاع وحداتٍ كانت موجودة بالفعل). ولم تنجح في الواقع إلا محاولة واحدة حين استطاع إنجليزي اسمه تشارلز لابوورث[6] أن ينحت مصطلح العصر الأوردفيشي بعد أن رأى أن بعض الصخور من الطبقات العليا من الكامبري ومن الطبقات الدنيا من السيلوري تستحقّ أن تشكل عصراً جيولوجياً خاصاً بها، ونجح في إقناع العدد الكافي من مجتمع الجيولوجيا بتسميتها عصراً في عام 1879. بحلول ذلك الوقت كان اثنان من كبار العلماء الإنجليز من رواد تسمية العصور، هما آدم سيدجويك صاحب تسمية الكامبري وورديك ميرتشيسون صاحب تسمية السيلوري والبرمي، كانا قد ماتا فتركا فراغا في ريادة المجال استغله لابوورث. وقد تميز هؤلاء الرجال بأنا متضخمة، وناضلوا بشراسة لـ «تسمياتهم الخاصة» للعصور الزمنية.

وجاء أهم تغير حقيقي طرأ على المقياس الزمني الجيولوجي من ناحية تاريخ الحياة مع إضافة العصرين الكريوجيني والإدياكاري خلال دهر الطلائع (طلائع الحياة/الحياة المستترة)، والزمن الذي كانت الحياة فيه تستعد لمجيء الحيوانات. ولكن ليس قبل تطور الحيوانات فحسب بل الحياة نفسها، كان على الأرض أن تمرّ بتغيرات كبرى لتدعم الحياة. وقد استمر العصر الكريوجيني (من الكلمتين الإغريقيتين بمعنى «برد» و«ولادة») من 850 حتى 635 مليون سنة مضت، وأقرته الجهة الحاكمة للتسميات الجيولوجية، اللجنة الدولية المعنية بدراسة طبقات الأرض والاتحاد الدولي للعلوم الجيولوجية IUGS، في عام 1990 م.[7] ويشكل الكريوجيني العصر الجيولوجي الثاني من حقبة الطلائع الحديثة، ويليه العصر الإدياكاري، وهو حديث أيضاً مقارنة بالعصور الأخرى. وكلتا هاتين المدتين الزمنيتين هما من الأزمنة الحاسمة في تاريخ الحياة، كما هو مبيَّن بتفصيل أكبر في الفصول المقبلة. وقد سُمّي العصر الإدياكاري على اسم جبال الإدياكارا في أستراليا الجنوبية، وهو العصر الجيولوجي الأخير من حقبة الطلائع الحديثة ومن دهر الطلائع الذي يسبق مباشرةً العصر الكامبري، العصر الأول من حقبة الحياة القديمة ومن دهر البشائر. وقد أُقرّ وضع العصر الإدياكاري بصفته عصراً جيولوجياً رسمياً في عام 2004 من قبل الاتحاد الدولي للعلوم الجيولوجية.[8]



إن المقياس الزمني الجيولوجي كما نعرفه هو خليط من علوم القرون التاسع عشر والعشرين والحادي والعشرين، وهو يشبه من هذه الناحية العلوم البيولوجية في تعاملها مع تصنيف الأحياء، لأن كليهما يرتكز على الادعاءات التاريخية والمشاهدات وأسبقية المصطلحات والتعاريف التي كثيراً ما تتضارب مع الوسائل الجديدة للتعريف - تعريف الأزمنة والأنواع في الحالة الأخيرة. ومثلما غيرت تحاليل الحمض النووي DNA جذرياً نظرتنا إلى التطور، فقد تضاربت الطرق الجديدة لتحديد عمر الصخور مع المقياس الزمني «النسبي» القديم الذي يرتكز على علاقات تسلسل طبقات الصخور والأحافير الموجودة فيها. وكثيراً ما تكون هذه التضاربات هائلة. ونتساءل: كيف سيكون شكل المقياس الزمني الجيولوجي بعد قرن من الآن؟ لا سيما باعتبار أن الجامعات الحديثة لم تعد تدرب وتخرِّج مختصين قادرين على تحقيق المعيار العالي لتعريف الحفرية الضروري لتحديد الوقت الجيولوجي حقاً. وربما لا تكون لهذا أهمية لو توفرت أداة جديدة *Star Trex* - من تلك التي نراها في الأفلام الخيالية - تسمح بمعرفة عمر أي صخر بضغطة زر أو تمرير ماسحة. ولكن للأسف لن يحدث هذا أبداً على الغالب. نحن محبوسون في التاريخ، سواء في الصخور أم في المناهج Method والتعاريف التاريخية لقياس عمرها. وقد عُمِّم هذا المقياس الزمني الجيولوجي إلى كواكب وأقمار أخرى بناءً على عدد آثار ضربات النيازك لكل وحدة مساحة، ولكل جرم سماوي مجموعة فريدة خاصة به من المصطلحات الجيولوجية التي يجب أن نتعلمها أيضاً.

2

التحول إلى كوكب شبيه بالأرض: ما بين 4.6-4.5 بليون سنة

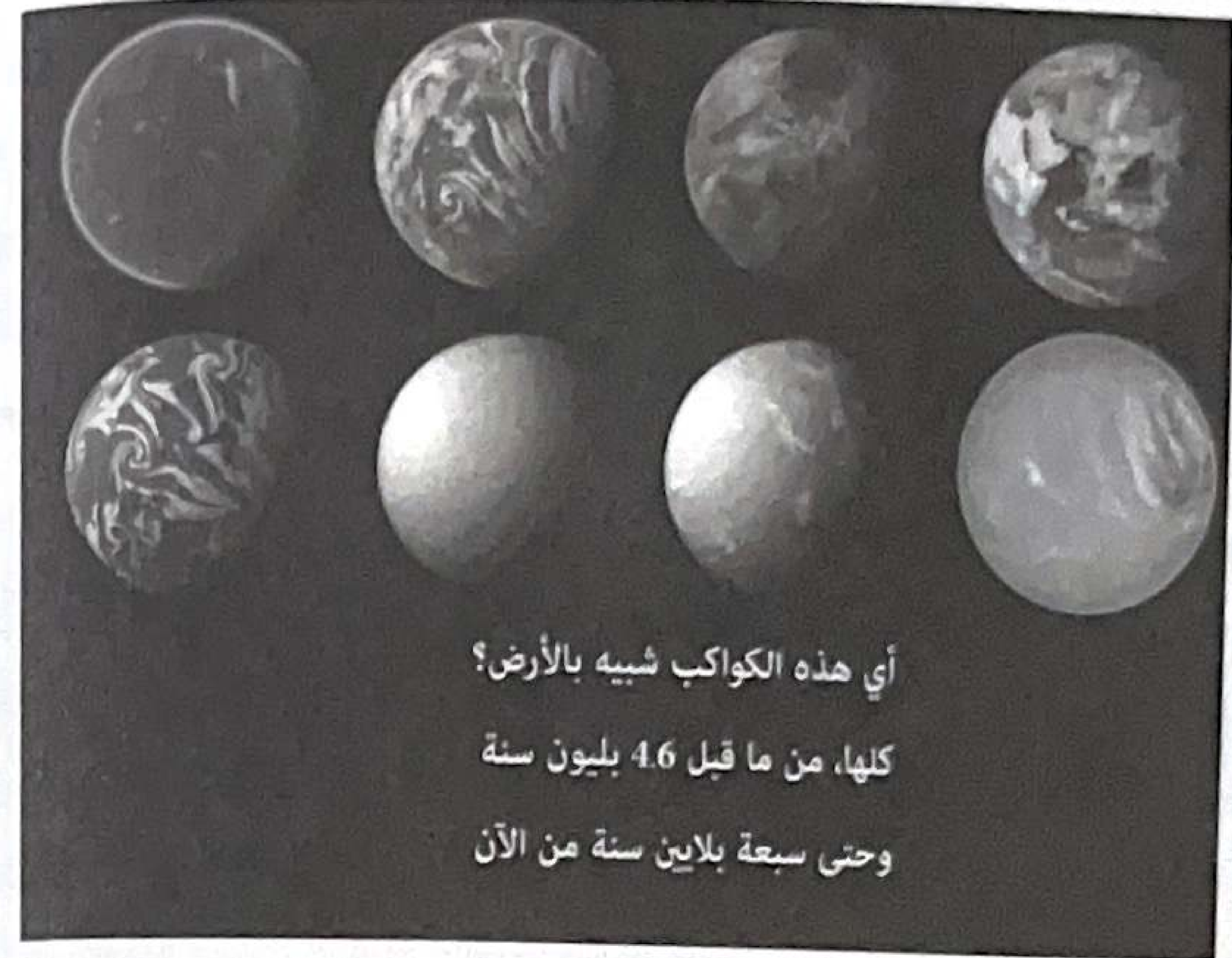
لم نعد نعتقد، بخلاف حتى أعظم المفكرين في عصر النهضة، أن الأرض مركز الكون ومركز المجموعة الشمسية والمكان الوحيد في الكون الذي توجد فيه الحياة والمخلوقات العاقلة على صورة إله خالق عظيم. نعرف الآن أن الأرض ليست إلا كوكباً بين كواكب عديدة، وأن الحياة الموجودة عليها ربما لا تكون أمراً متميزاً أيضاً. وأحدث مثال على هذا هو بحثنا عن كواكب شبيهة بالأرض يُكتشَف المزيد منها كل سنة،[1] وهذه الاكتشافات تغير الحديث عن تواتر مصادفة الحياة في الفضاء. ولكن هل يعني كون الكوكب «شبيهاً بالأرض» وجود الحياة؟ لننظر إلى ما مرّ به كوكبنا خلال تطوره الباكر حتى صار قابلاً للعيش فيه، وأخيراً حتى تشكلت الحياة عليه.

لقد اكتسح تحولان نوعيان الدراسات التي تقدم لنا مجتمعةً تاريخ الحياة على كوكبنا، وأحدثا تغيراً في الطرُز العلمية بين تسعينات القرن العشرين والحاضر. وقبل ذلك الوقت لم يكن الباحثون في تاريخ الأرض يولون اهتماماً يذكر للأرض بصفتها واحداً من الكواكب الكثيرة؛ وبالمثل، لم يكونوا يولون الاهتمام للحياة على الأرض بصفتها مجرد أحد أنواع الحياة التي يمكن أن تكون موجودة في الفضاء الكوني. ولكن اكتشاف كواكب تطوف حول النجوم الأخرى غيّر الوضع الراهن سواء من الناحية العلمية أم المجتمعية.[2] وأحدثت تلك الاكتشافات هزةً تجاوز تأثيرها المجالات العلمية الأولية المهتمة بالكواكب عدا الأرض، كالفلك وبعض التخصصات الفرعية في الجيولوجيا، مؤديةً إلى تأثيرات في المجالات البيولوجية وحتى في الأديان. وذكر جيف مارسي، وهو من أوائل مكتشفي الكواكب خارج المجموعة الشمسية Exoplanet، أن بين المكالمات الهاتفية الأولى التي تلقاها بعد هذا الاكتشاف العظيم كانت مكالمة من الفاتيكان، فقد أرادت الكنيسة الكاثوليكية الضليعة في أمور الفلك معرفة ما إذا كان هذا الكوكب صالحاً للحياة لكي تتدارس المقتضيات الدينية المترتبة على ذلك الاكتشاف.

في عام 1992 كان اكتشاف أول الكواكب خارج المجموعة الشمسية لكوكبٍ يدور حول نجم نابض Pulsar[3]، تبعه اكتشاف كوكب يطوف حول نجم من نجوم النسق الأساسي Main sequence star من نوعٍ أكثر رحمةً بتطور الحياة من النجوم النابضة

التي لديها عادة سيئة، وهي أنها تُطلِق دوريا نحو أي كوكب يطوف حولها نبضاتٍ ذات طاقة هائلة تُعقِّم أي شكل من أشكال الحياة.

وبعد سنة فقط من اكتشاف ذلك الكوكب الخارجي الثاني، أدى اكتشاف فلكي آخر من طبيعة مختلفة تماماً إلى إثارة عوالم العلوم والسياسة والعموم، وهو الإبلاغ عن نيزك من المريخ[4] استدلّ علماء **ناسا** أنه يحوي بصمات محتملة للحياة (وربما كذلك أحافير الميكروبات) وساهمت هذه الموجودات مجتمعةً في انطلاق مجال علمي جديد يسمّى البيولوجيا الفلكية.



بينما يكثر استخدام عبارة "كوكب شبيه بالأرض" في الوقت الراهن، يجب أن نتحقق في كل مرة عن ماهية الأرض التي نقصدها: الأرض في المراحل الباكرة من تاريخها، في أعلى يسار الصورة، وهي "عالم مياه" كامل، أو تلك في أقصى أسفل اليمين، بضعة بلايين سنة من الآن عندما تخسر الأرض محيطاتها للفضاء.

وقد وُجّهت مبالغ هائلة نحو مواضيع تاريخ الحياة والمسائل الأخرى المتعلقة التي لم تكن تحظى قبل هذه الاكتشافات بالتمويل الكافي، وكانت الأبحاث فيها قليلة، مثل منشأ الحياة الأولى على الأرض وطبيعتها. وقد بدأ هذا التغير العظيم في النصف الأخير من تسعينات القرن العشرين، وتحول بحلول القرن الجديد إلى أكثر مجالات العلوم نشاطاً، وقد حوّل العلم ولا يزال يضفي تغييرات على موضوع هذا الكتاب: تاريخ الحياة على الأرض وإدراكنا لاحتمال الحياة على الكواكب الأخرى ولتواريخ «أخرى» للحياة.

أصبحت حقيقة أنّ كوكبنا واحدٌ فقط بين كثير من الكواكب التي قد تعيش الحياة عليها، وكون حياتنا مجرد واحدة من الوصفات الكيميائية الممكنة العديدة، من

المسلمات بالنسبة إلى كثير من البيولوجيين الفلكيين الآن. ولكن الاحتياجات الكثيرة للكائنات المعقدة المكافئة للحيوانات والنباتات العليا التي تعيش على أرضنا حالياً ليست بسيطة. إن نوع الحياة الموجود على الأرض ربما لا يكون فريداً (على الأقل من حيث التعقيد). ولكن أحدنا (وورد) يرى أن كلمة «نادر» مناسبة هنا، ومن هنا تأتي فرضيته، فرضية الحياة النادرة،[5] والتي تُقرّ بأنه على الرغم من احتمال أن تكون الحياة الميكروبية شائعة في الكون فإن تلك النُظم، ولا سيما المدة الزمنية لاستقرار الظروف البيئية على كوكب ما، والتي تسمح بحصول التطور وصولاً إلى ما يكافئ الحيوانات الأرضية، قد تكون نادرة حقاً.

ما هو «الكوكب الشبيه بالأرض»؟

قد يكون هذا الرأي من تظاهرات الشوفينية الأرضية، وقد يتبين أن الحياة كالتي نعرفها هي الحياة الوحيدة الممكنة في الكون. ولكن البحث عن الكواكب خارج المجموعة الشمسية يرمي في صميمه إلى اكتشاف «كواكب الأرض» الأخرى، فتطرح نفسُها مسألةَ تعريف ما هو الكوكب الشبيه بالأرض في الحقيقة. يوجد عندنا جميعنا مفهوم حول كوكبنا في الحاضر: كوكب تسوده المحيطات، مكان أخضر وأزرق، وطننا وبيتنا. ولكن لو عدنا في الزمن إلى الوراء أو تقدمنا إلى الأمام؛ لوجدنا أن الأرض كانت في الماضي وستصبح حتماً في المستقبل مكاناً يختلف كثيراً عن الكوكب الذي نسميه الآن بيتنا. فيتبين أن «الشبيه بالأرض» تعريف زمني إضافة إلى كونه تعريفاً «مكانياً».

هناك تعاريف متنوعة لا تزال سارية في الفلك والبيولوجيا الفلكية، وهما المجالان اللذان يُعنيان أكثر من غيرهما بتحديد نوع الكوكب الذي نعيش عليه. وتقول التعاريف الأكثر شمولية واتساعاً إن الكوكب الشبيه بالأرض له سطح صخري ونواة أكثر كثافةً. أما بالمعنى الأضيق؛ فيجب أن يتصف بتوفر ضروريات مهمة تخص «الحياة كما نعرفها»، بما في ذلك درجات الحرارة المعتدلة والغلاف الجوي الذي يسمح بتشكل الماء السائل على سطحه. وكثيراً ما يُستخدم تعبير «الكوكب الشبيه بالأرض» للإشارة إلى كوكب يشبه الأرض المعاصرة، لكننا نعرف أن الأرض قد تغيرت كثيراً خلال 4.567 بليون سنة مضت منذ تشكلت. فخلال بعض الأجزاء من تاريخ الأرض لم يكن كوكبنا الشبيه بالأرض يدعم الحياة مطلقاً، وخلال أكثر من نصف تاريخه بقيت الحياة المعقدة كالحيوانات والنباتات الراقية مستحيلة. فقد كانت الأرض رطبة طوال كامل تاريخها عملياً. فبعد

مئة مليون سنة عقب حادثة تشكل القمر، عندما اصطدم كوكب أولي بحجم المريخ بجرم سماوي بحجم الأرض كان لايزال في طور التنامي، كان هناك ماء سائل. هل هي مصادفة؟ أم مجرد نتيجة لوابل عظيم من المذنبات المشبعة بالماء يرتطم بسطح الأرض مسبباً طوفاناً من خارج الأرض؟

وتأتي الأدلة من ذرات الرمل الدقيقة في معدن الزركون[6] الذي حُدِّد عمره راديومترياً (شعاعياً) بنحو 4.4 بليون سنة. وتحمل هذه الذرات بصمات نظائرية Isotopic لمياه المحيطات التي امتصها وشاح الأرض Mantel في عملية اندساس Subduction من نمط صفيحة تكتونية. ومع أن شمسنا كانت أقل طاقةً في بدايات تاريخ الأرض، كان في الغلاف الجوي ما يكفي من غازات الدفيئة للمحافظة على دفء كوكبنا. ولكن النشاط البركاني على الأرض الباكرة يحتمل أنه كان أقوى بعشر مرات مما هو عليه الآن، ومن ثَمَّ كان كم هائل من الحرارة ينبع من الأرض؛ فيدفئ محيطاتها ويابستها. ويعتقد بعض البيولوجيين الفلكيين الآن أن الحياة على الأرض لم يكن ظهورها ممكناً حتى خفت الحرارة الكوكبية إلى درجات أقل بكثير مما كانت عليه في البليون سنة الأولى من تاريخ الأرض، وهذا أحد الأسباب الكثيرة للتفكير في احتمال أن الحياة بدأت على كوكب آخر، ربما المريخ. ولكن كان هناك كوكب آخر شبيه بالأرض في بدايات تاريخ مجموعتنا الشمسية، وهو الزهرة.

يُفترض أن الزهرة في بدايات تاريخها[7] كانت ضمن النطاق القابل للحياة في المجموعة الشمسية، مع أن درجة حرارة سطحها حالياً تصل إلى 900 فهرنهايت (500 سيليزية) نتيجة تأثير الدفيئة الجامح الذي جعل سطحها عقيما تماماً بالتأكيد (فمع أن بعضهم يعتقد باحتمال وجود حياة ميكروبية هناك، فإن هذا يبدو لنا احتمالاً بعيداً جداً). وبالعكس، يشير السجل الجيولوجي للمريخ بوضوح إلى وجود مياه جارية على سطحه، بما في ذلك ضمن أنهار كبرى وجداول استطاعت أن تصقل الحصى وتشكل مراوح الطمي.[8] والآن مياهه مفقودة أو متجمدة أو ليست إلا بخاراً مخلخلاً في غلافه الجوي القريب من الفراغ. ويفترض أن كتلته الصغيرة منعت حدوث عمليات الصفائح التكتونية الضرورية لإعادة تدوير القشرة؛ مما أدى إلى انخفاض التدرج الحراري Thermal gradients في نواته المعدنية، وهي ضرورية لتوليد مجال مغناطيسي يحمي الغلاف الجوي، وبعده عن الشمس سمح له بالانزلاق بسهولة أكبر إلى حالة «أرض كرة الثلج» الأزلية. ولو كانت الحياة على المريخ موجودةً يوما ما؛ لاحتُمِل أنها لا تزال موجودة تحت سطحه تستمد الطاقة من القدرة الجيوكيميائية الطفيفة من التحلل الإشعاعي.

قبل نحو 4.6 بليون سنة[9] تشكلت الأرض الأولية من تكتل «كواكب مصغرة» من شتى الأحجام، أي أجرام صغيرة من الصخر والغازات المتجمدة التي تركزت في مستوى مسار الشمس، المنطقة المسطحة من الفضاء التي تدور فيها جميع كواكبنا. وقبل 4.567 بليون سنة (مؤرخة بدقة والرقم سهل الحفظ) يبدو أن جرماً بحجم المريخ ارتطم بالأرض الأولية؛ مما أدى إلى اندماج نواتي الكوكبين المؤلفتين من النيكل والحديد وإلى تكاثف القمر من «جو» بخار السيليكون Silicon - Vapor الذي بقي موجوداً لمدة زمنية قصيرة بعد الحادثة. هذا الكوكب الجديد خلال بضع مئات من الملايين من السنين من وجوده تعرض لقصف ثقيل ومستمر بالنيازك بشدة عارمة.

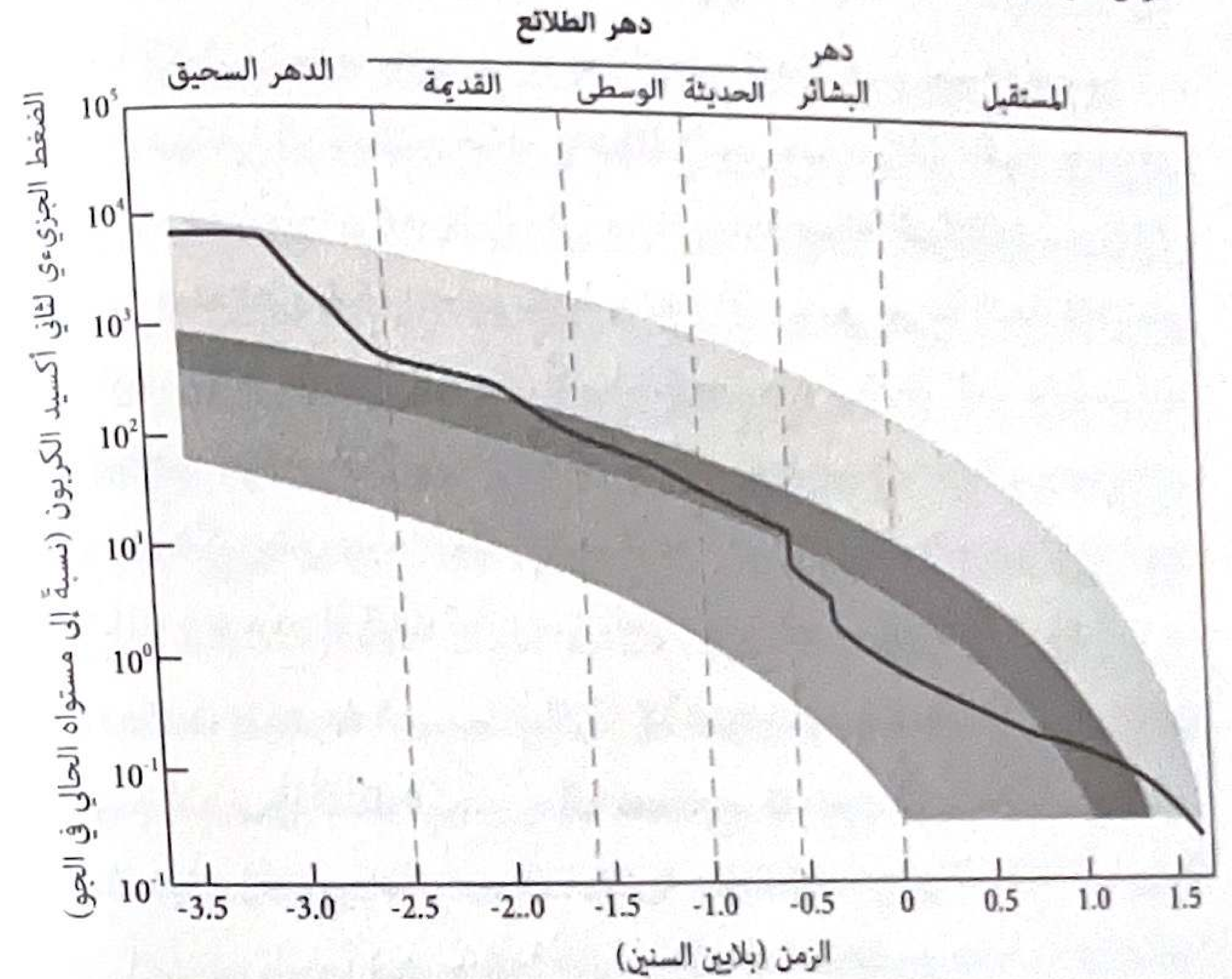
ومن المؤكد أن حرارة سطح الأرض المتشكل، والتي كانت قريبة من حرارة الحمم البركانية، والطاقة المنطلقة من وابل النيازك المتساقطة عليه خلال هذا القصف الثقيل، جعلت الظروف المحيطة غير ملائمة للحياة.[10] والطاقة الناتجة من هذا الإمطار المستمر وحده بالمذنبات العملاقة والكويكبات قبل نحو 4.4 بليون سنة كانت كافية لتجعل درجات الحرارة في مناطق من سطح الأرض كافية لصهر الصخور السطحية كلها وتحافظ عليها بالحالة المنصهرة. ولم تكن هناك فرصة لتشكل الماء السائل على السطح.

بدأ الكوكب الجديد يتغير بسرعة بعد التحامه البدئي؛ فمنذ نحو 4.56 بليون سنة بدأت الأرض تنفرز إلى طبقات مختلفة. فالمنطقة الأعمق منها، أي اللبّ (النواة) Core التي تتألف بالدرجة الأولى من الحديد والنيكل، صارت محاطة بمنطقة أقل كثافة تسمّى الوشاح؛ وتشكلت فوقه قشرة رقيقة تتصلب بسرعة وكثافتها أقل منه، في حين ملأ السماء غلاف جوي عكر كثيف يتألف من بخار الماء وثاني أكسيد الكربون. ومع أن الأرض كانت خالية من المياه على سطحها، فيفترض أن كميات هائلة من الماء كانت محبوسة في باطن الأرض وموجودة في الجو على شكل بخار. وبينما كانت العناصر الأخف تطفو إلى الأعلى والعناصر الأثقل تغوص، لُفظ الماء وغيره من المركبات الطيارة من باطن الأرض وأضيف إلى الغلاف الجوي.[11]

وكانت المجموعة الشمسية الباكرة مكاناً تملؤه الكواكب الجديدة وكثير من الحطام الذي لم تُشتمَل في تشكل الكواكب، وكلها تدور حول الشمس. ولكن لم تكن جميع المدارات مستقرة، أي إهليلجية ذات انحرافات مدارية صغيرة كما نشهد في الكواكب المعاصرة، إذ كان كثير منها منحرفاً جداً، ومداراتٌ أكثر من ذلك كانت تتقاطع مع مدارات الكواكب حول الشمس. ومن ثَمَّ تعرّضت المجموعة الشمسية كلها إلى قصف فضائي كان أقصاه بين 4.2 و3.8 بليون سنة مضت. وبعض هذه الأجرام، ولا سيما المذنبات، ربما ساهمت في ميزانية الكواكب

من الماء، ولكن هذه الفكرة لا تزال موضع جدال واسع. ونحن ببساطة لا نعرف كمية الماء التي أوصلتها الضربات الفضائية إلى الأرض الباكرة. والاكتشاف الذي حدث مؤخراً، وهو أن آثار الماء الموجودة في العينات من القمر مماثلة لمعظم الأرض، يوحي أن أغلب غلافنا المائي والجوي كان ذائباً في محيط الحمم المنصهرة (الماغما Magma) العالمي الذي تشكل بعد الاصطدام الهائل بكوكب أولي بحجم المريخ اسمه ثيا Thaea.

ولكن لو كانت على الأرض في ذلك الوقت حياة؛ لهلكت بكل تأكيد. فقد عدّ علماء ناسا نمذجات رياضياتية لأحداث اصطدام كهذا. فاصطدام جرم قطره 500كم بالأرض يؤدي إلى كارثة من شبه المستحيل تصورها: مناطق ضخمة من سطح الأرض الصخري ستتبخر مشكّلةً سحابة من «غاز الصخر» فائق التسخين أو أبخرة حرارتها عدة آلاف درجة. ومثل هذا البخار في الجو يؤدي إلى تبخر المحيطات تماماً إذ تغلي حتى تجف تاركةً وراءها زبداً من الملح المنصهر في قيعانها. طبعاً، سيحدث تبريد بالإشعاع إلى الفضاء، ولكن لن تتشكل محيطات جديدة نتيجة الأمطار قبل مرور عدة آلاف من السنين بعد الحدث. إن كويكباً أو مذنباً مثل هذا، أي بحجم ولاية تكساس، يستطيع أن يبخّر محيطاً عمقه عشرة آلاف قدم مع تطهير الأرض كلها من الحياة خلال هذه العملية.[12]



ثاني أكسيد الكربون على مر الزمن (بلايين السنين) مع تقدير القيم في المستقبل. (الصفر يمثل الحاضر)

ومنذ نحو 3.8 بليون سنة، ومع أن زمن القصف الأقسى بالنيازك كان قد مضى، فإن تكرار الاصطدامات الشديدة كان أكثر بكثير من الأزمنة الأحدث. وكان طول اليوم مختلفاً أيضاً، إذ كان أقل من عشر ساعات لأن دوران الأرض حول نفسها كان أسرع حينذاك. والشمس كانت تبدو أقل سطوعاً بكثير، ربما كرةً حمراء منخفضة الحرارة، وذلك ليس فقط لأنها كانت تسطع بطاقةٍ أقل بكثير منها حاليا، بل لأن أشعتها كانت تعبر الغلاف الجوي العكر السام المتكوّن من سحابات ثاني أكسيد الكربون وكبريتيد الهيدروجين وبخار الماء والميثان، ولم يكن هناك أكسجين في الجو ولا في المحيطات. والسماء نفسها كانت على الأغلب حمراء أو قرميدية اللون، والبحار التي كانت تغطي بالتأكيد أغلب سطح الأرض كانت بلون طيني بنيٍّ. إلا أن الأرض كانت عقاراً فيه غاز وماء سائل وقشرة صخرية فيها شتى المعادن والصخور والبيئات، بما فيها تلك التي يُعتقَد حالياً أنها ضرورية لتطور الحياة على مرحلتين: إنتاج شتى «القطع» ثم تجميعها كلها على أرض ورشات المصنع.

النُّظم الضرورية لدعم الحياة وتاريخها

من أهم الشروط الأولية لنشوء الحياة على الأرض أن تكون غازات الغلاف الجوي «مُختَزِلَة» (مُرْجِعَة Reducing) بما يكفي للسماح بتشكل جزيئات البريبتيوتك Prebiotic molecuke، وهي لَبِنات (وحدات) بناء الحياة على الأرض. ويمكن تذكُّر العمليات الكيميائية المعروفة بالأكسدة Oxidation والاختزال (الإرجاع Reduction) من قاعدة OIL-RIG: الأكسدة خسارة (OIL: Oxidation is loss) والاختزال مكسب (RIG: Reduction is gain)؛ وهذا يشير إلى أن المُركب يعطي الإلكترونات (أي يخسرها) أو يتلقى الإلكترونات (أي يكسبها). وتشبه الإلكترونات النقود التي يمكن الاستعاضة عنها بالطاقة: خلال الأكسدة يُدفع الإلكترون مقابل كسب الطاقة. وفي الاختزال يكون كسب الإلكترون مثل إيداع النقود في البنك، وهذه النقود تكون على شكل الطاقة. مثلاً، النفط والفحم في حالة «اختزال»، أي إن فيهما طاقة كثيرة في البنك يمكن تحريرها بالأكسدة عندما نحرق هذين الوقودين؛ أي إننا نؤكسدهما من أجل إنتاج الطاقة.

وموضوع تركيب الغلاف الجوي للأرض في تاريخها الباكر موضوع خلافي تجري عليه أبحاث كثيرة. وبينما يحتمل أن تكون كمية النيتروجين قريبة مما نراه حاليا، فهناك أدلة

وفيرة ومتنوعة تشير إلى أن الأكسجين كان قليلاً أو معدوماً. ولكن ثاني أكسيد الكربون كان موجوداً بكميات أكبر بكثير مما هي اليوم، وهذا الجو الغني بثاني أكسيد الكربون كان من شأنه أن يخلق ظروفاً تشبه البيوت الزجاجية، من خلال تأثير دفيئة فائق عندما كان ضغط ثاني أكسيد الكربون أعلى بعشرة آلاف مرة مما هو عليه حاليا.[13]

يتكون جوّنا حاليا من 78 في المئة نيتروجينا و21 في المئة أكسجينا وأقل من واحد في المئة ثاني أكسيد الكربون والميثان، ويبدو أن هذا التركيب جديد نسبياً. ويتبين بوضوح أن غلافنا الجوي يمكن أن يغير تركيبه بسرعة عالية نسبياً، ولا سيما في ذلك الجزء الواحد في المئة الذي يشمل ثاني أكسيد الكربون والميثان والذي قد يخدعنا بصغره الظاهري، فهذان الغازان اثنان مما يسمّى بغازات الدفيئة (إضافة إلى بخار الماء)، وأهمية هذه الغازات تفوق بكثير نسبتها في الغلاف الجوي.

دورات العناصر ودرجة حرارة العالم

يتطلب جسمنا البشري عدداً هائلاً من العمليات المعقدة للمحافظة على الحالة الغريبة التي نسميها الحياة، ويشمل كثير من هذه النظم حركةَ عنصر الكربون. وبالمثل، فإن حركة الكربون والأكسجين والكبريت هي الأوجه الرئيسة في المحافظة على البيئات الملائمة للحياة على الأرض، وحركة الكربون أهمها.

يمرّ الكربون بدورات نشيطة ينتقل خلالها بين الأطوار الصلب والسائل والغازي. وانتقال الكربون بين المحيطات والغلاف الجوي والحياة يسمّى دورة الكربون، وهذه الحركة هي صاحبة التأثير الحاسم في تغير درجة حرارة الأرض نتيجة تفاوت تراكيز غازات الدفيئة. وما نطلق عليه تسمية دورة الكربون يتألف في الواقع من دورتين مختلفتين (إلا أنهما متقاطعتان) وهما: دورة الكربون قصيرة الأمد، ودورة الكربون طويلة الأمد.[14] هذا وتهيمن الحياة النباتية على دورة الكربون قصيرة الأمد، إذ يجري تثبيت ثاني أكسيد الكربون خلال البناء الضوئي؛ فيُحتبس بعض الكربون على شكل نسيج نباتي حي، وهو مركب اختزالي، ومن ثَمّ غني بالطاقة التي يمكن تحريرها. وعندما تموت النباتات أو تتساقط أوراقها ينتقل هذا الكربون إلى التربة، ويمكن أن يتحول مرة أخرى إلى مركبات الكربون المختلفة في أجسام ميكروبات التربة والنباتات أو الحيوانات الأخرى، حيث تجري أكسدة مركبات الكربون مع كسب الطاقة من قبل الكائن الذي يقوم بالأكسدة.

وفي الوقت نفسه، تُحوّل الكائنات الحية أيضاً جزيئات الكربون الأخرى إلى حالة الاختزال، حيث يمكن استخدامها للطاقة. وخلال مرور الكربون عبر السلسلة الغذائية للحيوانات يمكن أكسدة هذا الكربون نفسه، ثم ينطلق مع الزفير من الحيوان أو الميكروب على شكل ثاني أكسيد الكربون، وهكذا يمكن أن تتجدد الدورة. لكن في أحيان أخرى يمكن أن يُطمَر الكربون المختزل الغني بالطاقة المحبوس ضمن أنسجة النباتات أو الحيوانات دون أن تستهلكه كائنات أخرى، فيصبح جزءاً من المخزن الضخم من الكربون العضوي ضمن القشرة الأرضية. وفي هذه الحالة لا يعود هذا الكربون جزءاً من دورة الكربون قصيرة الأمد.

وتدخل دورة الكربون الثانية، أي دورة الكربون طويلة الأمد، في أنواع التحولات التي تختلف كثيراً عن الموصوفة في دورة الكربون الأولى. والنقطة الأهم هي أن دورة الكربون طويلة الأمد تشمل انتقال الكربون من السجل الصخري إلى المحيطات أو الغلاف الجوي ثم عودته إلى القشرة الأرضية مرة أخرى. والمقياس الزمني لهذا الانتقال يقاس عموماً بملايين السنين. وانتقال الكربون إلى الصخور ومنها قد يكون أدى إلى تغيرات في الغلاف الجوي للأرض أكبر مما حصل نتيجة دورة الكربون قصيرة الأمد؛ لأن الكربون المحبوس في الصخور كان أكثر من الموجود في المحيطات والبيوسفير (الغلاف الجوي - أي إجمالي الكائنات الحية) والغلاف الجوي معاً. قد يبدو هذا مفاجئاً؛ لأن كمية المادة الحية وحدها ضخمة. لكنّ بوب بيرنر، من جامعة ييل، أجرى حسابات تقول إنه لو تمّ حرق كل نبات على كوكبنا فجأة وانطلقت كل ذرات الكربون المكونة لهذه النباتات إلى الغلاف الجوي؛ لرفعت حلقةُ الكربون قصيرة الأمد هذه ثانيَ أكسيد الكربون الجوي بنحو 52 في المئة. وللمقارنة، فإن التغيرات طويلة الأمد التي حصلت في الماضي كانت مسؤولة عن تذبذبات ثاني أكسيد الكربون إلى الأعلى أو إلى الأدنى بأكثر من عشرة أضعاف.

ومن النواحي المحورية في دورة الكربون الأرضية كربونات الكالسيوم أو حجر الجير Limestone. وتدخل هذه المادة الشائعة في الأرض في تركيب هياكل أغلب اللافقاريات ذات الهياكل، كما توجد في العوالق النباتية Planktonic plants الدقيقة التي تسمّى ذوات البذيرات الجيرية *Cocolithophorids* والتي تتراكم هياكلها فتشكل صخراً رسوبياً يُعرف بالطباشير. وتساهم هياكل ذوات البذيرات الجيرية بصورة حاسمة في كون الأرض قابلة للعيش؛ لأنها تساعد على السيطرة على درجات الحرارة على المدى الطويل لتبقى ضمن مجال ثابت. ونتيجة عملية تكتونيات الصفائح المعروفة بالاندساس يُحمل بعض

هذا الطباشير بواسطة حزام النقل التكتوني إلى مناطق الاندساس، وهي انخسافات طويلة في القشرة الأرضية حيث تغور قشرة المحيطات إلى أعماق الأرض. وعلى عمق أميال كثيرة، بعد أن غاصت إلى ما تحت قيعان البحار، تؤدي الحرارة والضغط الكافيان إلى تغير الهياكل الكلسية والسيليكاتية إلى فلزات جديدة مثل السيليكات إضافة إلى غاز ثاني أكسيد الكربون. وبعد ذلك تشق هذه المعادن وغاز ثاني أكسيد الكربون الساخن طريقها إلى سطح الأرض ثانيةً على شكل ماغما (صُهارة) صاعدة غنية بالغاز، حيث تنقذف هذه المعادن على شكل حمم بركانية ويتحرر الغاز إلى الغلاف الجوي.

إذن، هذه هي العملية الرئيسة في دورة الكربون: يتحول ثاني أكسيد الكربون إلى أنسجة حية، وهذه الأنسجة تتحلل - في النهاية - وتساعد على تشكيل هياكل الأنواع الأخرى من الحيوانات والنباتات، وهذه تندمج - في النهاية - في الحمم والغاز في أعماق الأرض، وهذه تنتقل راجعةً إلى السطح لتتكرر الدورة. وهكذا، فلدورة الكربون طويلة الأمد أثر عظيم في تركيب غازات الغلاف الجوي الذي يتحكم بدوره في درجة حرارة العالم إلى حد بعيد. ولما كانت عمليات دفن الترسبات وتعريتها إضافة إلى التجوية الكيميائية Chemical weathering هي المكونات الأساسية التي تحدد كمية وسرعة إنتاج هياكل الكائنات الكربوناتية والسيليسية في البحر، فإن كمية المعادن التي تغوص في بطن مناطق الاندساس الذي لا يشبع تحدد كمية ثاني أكسيد الكربون والميثان التي يُعاد ضخها إلى الغلاف الجوي من خلال البراكين. ومن ثَمَّ، فإن العملية كلها إجمالاً تخضع إلى حد بعيد لسيطرة الحياة، وفي النهاية تسمح بوجود الحياة على الأرض. وفضلاً عن التحكم في التراكيز الجوية، فإنها تمثل ما قد نسميه منظم حرارة عالميا، لأنها تتصف بجانب التغذية الراجعة إلى الدورة الذي ينظم درجة الحرارة على الأرض على المدى الطويل.

ويعمل المنظم الحراري كالآتي: لنفترض أن كمية ثاني أكسيد الكربون المنطلقة من براكين الأرض تزداد؛ مما يؤدي إلى زيادة ثاني أكسيد الكربون والميثان في الغلاف الجوي. وعندما تشق جزيئات هاتين المادتين طريقها إلى الطبقات العليا من الجو، فإنها تؤدي إلى انعكاس الطاقة المتصاعدة عن سطح الأرض (بعد أن وصلت إليه من الشمس) نحو سطح الأرض مرة ثانية. هذا هو تأثير الدفيئة. وعندما يزداد احتباس الطاقة الحرارية في الغلاف الجوي ترتفع درجة الحرارة في كل أرجاء كوكبنا، وهذا يؤدي على المدى القريب إلى تبخر كميات أكبر من الماء السائل الذي ينتقل إلى الغلاف الجوي على شكل بخار الماء، وهو الآخر من غازات الدفيئة. ولكن لهذا الاحترار عواقب مهمة، فبزيادة درجات الحرارة تزداد معدلات التجوية الكيميائية

Chemical weathering، وهذا مهم أكثر فيما يتعلق بتجوية المعادن السيليكاتية. كما رأينا، عملية التجوية هذه تؤدي في النهاية إلى تشكل الكربونات أو أنواع جديدة من المعادن السيليكاتية، لكنَّ عملية التجوية بحد ذاتها تنـزع ثاني أكسيد الكربون من الغلاف الجوي.

وبزيادة معدلات التجوية يجري سحب كميات أكبر وأكبر من ثاني أكسيد الكربون من الغلاف الجوي؛ فيشكل مركبات كيميائية أخرى لا تؤثر بشكل مباشر في درجة حرارة العالم. ومع بداية انخفاض تراكيز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي تبدأ درجة حرارة العالم بالانخفاض أيضاً بفضل انخفاض كفاءة الدفيئة بسبب انخفاض كمية جزيئات غازات الدفيئة في الغلاف الجوي. وفي الوقت نفسه تتناقص معدلات التجوية مع البرودة؛ فيقل عدد الهياكل المترسبة لأن شوارد البيكربونات والسيليكات التي يمكن انتقاؤها صارت أقل. وهذا بدوره يؤدي إلى انخفاض كمية ترسبات الهياكل التي تخضع للاندساس وإلى انخفاض حجم ثاني أكسيد الكربون في الغازات البركانية. والآن الأرض تتبرد بسرعة. ولكن مع تبردها تنخفض أحجام كثير من النُّظم البيئية مثل الشعاب المرجانية أو مناطق العوالق السطحية، ومن ثم ينخفض الطلب على ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي. وفي مثل هذا العالم تبدأ البراكين بإطلاق كميات أكبر من ثاني أكسيد الكربون؛ مما تستطيع الكائنات الحية استهلاكه، فتتكرر الدورة.

إن معدلات التجوية الحاسمة لا تتأثر بدرجات الحرارة فحسب، فالصعود السريع لسلسلة جبلية قد يؤدي إلى تزايدٍ في تعرية المعادن السيليكاتية بصرف النظر عن درجات الحرارة. ومن ثَمَّ، فإن صعود الجبال يسبب زيادة سرعة تجوية هذه المعادن وإزالة المزيد من ثاني أكسيد الكربون من الغلاف الجوي؛ فتتبرد الأرض بسرعة. ويعتقد الكثير من الجيولوجيين أن التنامي السريع لسلسلة جبال الهيمالايا الضخمة والوعرة أدى إلى هبوط مفاجئ في مستويات ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي، ومن ثَمَّ أدى إلى (أو على أقل تقدير، ساهم في) التبريد الذي سبَّب في النهاية العصر الجليدي البليستوسيني الذي بدأ منذ نحو مليونين ونصف مليون سنة مضت.[15]

والعامل الثالث الذي يؤثر في معدلات التجوية الكيميائية هو نمط الحياة النباتية ومدى غزارتها. فالنباتات «العليا» Higher (متعددة الخلايا Multi cellular) فعالة جداً في التسبب بالتعرية الفيزيائية للمواد الصخرية؛ مما يؤدي إلى زيادة مساحة السطح الذي تعمل عليه التجوية الكيميائية. والزيادة المفاجئة في غزارة

النباتات أو تطور شكل جديد من نباتات ذات جذورٍ أعمق مثل التي نراها في أغلب الأشجار قد تكون لها تأثيرات تشبه الصعود السريع لسلسلة جبلية جديدة؛ إذ تزداد سرعات التجوية؛ مما يؤدي إلى انخفاض درجة حرارة العالم. والعكس، أي زوال الأشجار من خلال الانقراض الجماعي أو إزالة الغابات بسبب النشاط البشري، يؤدي إلى تسخين الغلاف الجوي بسرعة.

بل إن حركة القارات هي الأخرى يمكن أن تؤثر في سرعات التجوية العالمية ومن ثَمَّ في المناخ العالمي. ولما كانت التجوية تجري أسرع في درجات الحرارة الأعلى، فالعالم، حتى ولو كان يمر في وسط حقبة بارد جداً سيصبح أبرد إذا انزاحت القارات الكبرى إلى خطوط العرض الاستوائية من خطوط العرض العليا.

والتجوية الكيميائية بطيئةٌ إلى حد كبير في المنطقتين القطبيتين الشمالية والجنوبية، لكنها سريعة عند خط الاستواء. وسيكون لتحرك القارات إلى المناطق الاستوائية تأثيره في درجة حرارة العالم. والتأثير الآخر لمواقع القارات ينجم عن المواقع النسبية لها؛ فلا يمكن لأي كمية من التجوية الكيميائية أن تغير درجة حرارة العالَم إذا لم تصل الذوائب الرئيسة وأنواع المعادن الضرورية لبناء الهياكل إلى البحار. والمياه الجارية هي التي توصلها إلى البحار، ولكن إذا اندمجت جميع القارات، كما حصل في تشكيل بانغيا Pangaea منذ نحو 300 مليون سنة مضت، فإن مساحات شاسعة من القارة الفائقة ستكون محرومة من الأمطار ولن يكون فيها أنهار تصل إلى البحر. ومع أن كميات هائلة من البيكربونات والكالسيوم المذاب وشوارد السيليكات قد تتشكل في وسط هذه القارة العملاقة، فلن يصل أغلبها أبداً إلى محيطات العالم.

وبالنتيجة، تنخفض معدلات التجوية في ظروف قلة الأمطار، حتى في درجات الحرارة الأعلى، وربما لا يعمل نظام التغذية الراجعة Feedback system بالكفاءة التي يعمل بها في حال القارات المنفصلة. ونقص طول الشواطئ القارية بسبب اندماج القارات يؤثر بشدة في المناخ العالمي؛ لأن أغلب المناطق التي كانت سابقاً تتأثر بالمناخ البحري وأراضي المستنقعات تكون قد تحولت إلى مناطق بعيدة عن البحر ومياهه. فمعدلات التجوية في الصحارى والمنطقتين القطبيتين منخفضة؛ مما يساعد على تدفئة العالم من خلال خفض امتصاص ثاني أكسيد الكربون من الجو بواسطة المعادن التي هي منتجات جانبية للتجوية.

مستويات ثاني أكسيد الكربون والأكسجين في دهر البشائر (الحياة الظاهرة)

ربما كان تغير الحجوم (الذي تظاهر بتغير الضغط الجزيءي للغازات في الجو) لغازَين اثنين ضروريين للحياة وهما: ثاني أكسيد الكربون (للنباتات) والأكسجين (للحيوانات)، من أهم العوامل الفيزيائية، عدا الحرارة، في التأثير في تاريخ الحياة على الأرض. فقد كانت الكميات النسبية لثاني أكسيد الكربون والأكسجين في الغلاف الجوي لكوكبنا تتحدد على مرّ الزمن (ولا تزال كذلك) بطيف واسع من العمليات الفيزيائية والبيولوجية، ويتفاجأ أغلب الناس عندما يعلمون أن مستوى كليهما قد تفاوت تفاوتاً ملموساً حتى في أوقات حديثة نسبياً وفق المقاييس الجيولوجية. ولكن لماذا يتغير تركيز هذين الغازين أساساً؟ المحددات الأساسية لذلك هي سلسلة من التفاعلات الكيميائية التي تشمل كثيراً من العناصر الشائعة على سطح الأرض وضمن قشرتها، بما فيها الكربون والكبريت والحديد. وتشمل التفاعلات الكيميائية الأكسدة والاختزال كليهما. وفي كل الحالات يتحد الأكسجين الحُرّ بالمركبات التي تحوي الكربون أو الكبريت أو الحديد لتشكيل مركبات كيميائية جديدة، وبهذا يُزال الأكسجين من الغلاف الجوي ويتخزن في المركبات المتشكلة من جديد. ويتحرر الأكسجين إلى الغلاف الجوي بواسطة تفاعلات أخرى تشمل اختزال المركبات الكيميائية، وهذا ما يحدث في أثناء البناء الضوئي في النباتات، فهي تحرر الأكسجين الحر كمنتج جانبي في اختزال ثاني أكسيد الكربون من خلال سلسلة معقدة من التفاعلات الوسيطة.

وهناك عددٌ من النماذج المصممة خصيصاً لاستنباط مستويات الأكسجين وثاني أكسيد الكربون على مرّ الزمن، ومجموعة المعادلات التي يشار إليها بالاختصار GEOCARB هي الأقدم والأكثر تفصيلاً بينها.[16] وتستخدم هذه النمذجة التي صمّمها روبرت بيرنر، من جامعة ييل، لحساب مستويات الكربون. وإضافة إلى GEOCARB، فقد طوّرت نمذجات منفصلة من قبل بيرنر وتلاميذه لحساب الأكسجين، وهذه النماذج معاً تبين النزعات الكبرى في الأكسجين وثاني أكسيد الكربون على مر الزمن. ويمثل هذا العمل واحداً من أعظم انتصارات المنهج العلمي. وأهمية ارتفاع تراكيز الأكسجين وثاني أكسيد الكربون وهبوطها على مر الزمن واحد من أحدث وأهم ما فهمناه فيما يتعلق بتاريخ الحياة على الأرض.

ويعتقد بعضهم أنه منذ أربعة بلايين سنة كانت الظروف والمواد الموجودة على الأرض مناسبة لتشكل الحياة. ولكن كون الكوكب صالحاً للحياة لا يعني بالضرورة أنه سيصبح مسكوناً يوماً ما. ويبدو أن تشكل الحياة من اللاحياة، وهذا موضوع الفصل المقبل، كان أكثر التجارب الكيميائية تعقيداً في الدنيا كلها. وبينما يبدو أن علماء البيولوجيا الفلكية يتحدثون طوال الوقت عن مدى «السهولة» التي بدأت بها الحياة على الأرض، فعندما ندرس الأمر بشيء من الإمعان نجد أن السهولة ليست وصفاً مناسباً لبداية الحياة لا من قريب ولا من بعيد.

لقد توضح، أكثر من أي جانب آخر تقريباً، أن التفاعل بين شتى مكونات الغلاف الجوي للأرض، وتراكيز هذه المكونات، هي المحددات السائدة ليس فقط لنوع الحياة (وإمكانية ظهورها أساساً) على الأرض، بل كذلك لتاريخ تلك الحياة. والتقبّل المتزايد للأدوار المسيطرة لمستويات الأكسجين وثاني أكسيد الكربون في فهم الطرُز الكبرى لتقدُّم الحياة على كوكبنا، بل والتفاصيل الدقيقة لهذا التقدم، هو إلى حد كبير من ابتكارات القرن الحادي والعشرين في تفسير تاريخ الأرض؛ وينطبق هذا أيضاً على فهم دور غازين مهمين آخرين في قصة الحياة، كما سنشرح في الصفحات المقبلة: كبريتيد الهيدروجين، أي H_2S، والميثان CH_4. وحكايات هذه الغازات مدونةٌ في الصخور وفي الحياة، وكذلك في الموت.

3

الحياة والموت والحيّز المكتشف حديثاً بينهما

في عام 2006 بدأت تتسرب أخبارٌ إلى الأوساط العلمية عن الوضع الأكثر غرابة لتجارب تتعامل مع الحياة والموت وما يبدو أنه خليطٌ غريبٌ ومبهمٌ منهما. فقد تنامت هذه الموجودات أولاً كشائعات بين الزملاء، لتنضج ببطء في نقاشات متعاقبة في العديد من المؤتمرات العلمية، لتكتمل بعدئذ كزهرة يانعة في سلسلة من أبحاث لامعة كتبها عالم في البيولوجيا لم يكن معروفاً حتى ذلك الحين. إنه مارك روث Mark Roth الذي لم يكن ليبقى مجهولاً لمدة طويلة، وخصوصاً بعد أن منحته مؤسسة ماك آرثر MacArthur Foundation ما يُسمّى منحة العبقرية في عام 2010 على هذا العمل. إنه حقاً رائدٌ، فقد دخل أرضاً بعيدةً يمكن أن تخبرنا تفصيلاً كبيراً ليس حول ماهية "الحياة" فحسب، بل عما هو "العَيْش"، وعن إمكانية وجود أحدهما دون الآخر، ليس الآن فقط، بل خلال الوقت الطويل الذي انقضى حتى صارت الحياة على الأرض حقيقةً للمرة الأولى.

كان روث قد اكتشف أنّ الجرعات الصغيرة تحت القاتلة من كبريتيد الهيدروجين Hydrogen Sulfide تضع الثدييات في حالة لا يمكن وصفها إلا كحياة مُعَلّقة Suspended Animation.[1] وعلى الرغم من امتلاء مخزون الثقافة الشعبية بما يرتبط بهذه التسمية (من عالم الخيال العلمي بشكل رئيس)، فإن هاتين الكلمتين تصفان في الواقع شكلاً رائعاً لما جرى لتلك الحيوانات المعرضة للغاز. ولم يتوقف التحريك Animation، أو الحركة، في الجوانب الملحوظة للحيوانات المدروسة فحسب - فهي لم تعد تتحرك، وقد تباطأ عندها معدل التنفس ومعدل القلب إلى حد كبير - بل حتى في مستويات أكثر جوهرية أيضاً. وقد نقصت معدلات الوظائف النسيجية والخلوية السوية إلى حد كبير. وبعد ذلك حدث شيء أكثر إدهاشاً، إذ فقدت الثدييات قدرتها على تنظيم الحرارة Thermoregulation وتوقفت عن كونها ماصّة للحرارة Endothermy أو من ذوات الدم الحار Warm-Blooded، وارتدّت إلى حالة حبلية (عائدة إلى شعبة الحبليات Phylum Chordata) أكثر بدائية: مُطلقة للحرارة Ectothermy أو من ذوات الدم البارد Cold-Bloodedness. ولكنها لم تمت ولم تكن حقيقة على قيد الحياة، وكواحدة من أكثر المزايا الأساسية للثدييات، كانت كمثل الميتة، لكن ذلك الموت كان مؤقتاً. فقد

تمّ تعليق الحياة فيها لفترة محدودة من الوقت لأنه عندما توقف تطبيق الغاز، عادت الوظائف الحيوية الطبيعية كلها. وخارج نطاق التطبيقات الطبية الجلية، فإن هذا الفهم الجديد يتضمن أموراً كثيرة حول ماهية الحياة واللاحياة.

لقد كان حدس روث بسيطاً: توجد حالة بين الحياة والموت، حالة غير مستكشفة، وتقع ضمن مجال الاهتمام الطبي. وقد قدّم أيضاً مفاتيح لفهم سبب نجاة كائنات حية معينة من الانقراض الجماعي Mass Extinction، فربما لا يكون الموت نهائياً تماماً كما يُفترض عموماً.[2] وكان أمل هذا العالِم بأن يكون قادراً على نقل الكائنات الحية إلى ذلك الحيز ثم استعادتها منه. وفي الواقع ليست هناك كلمة إنجليزية تصف بدقة جوهر هذا الحيز، فقد أطلق صانعو الأفلام عليه اسم أرض الزومبي Zombie Land أو شيئاً من هذا القبيل، وربما سيتبنى العلم المتفاخر هذا المصطلح في نهاية المطاف، لكننا نشكك بذلك.

ومن تجاربه البارعة أن روث أخذ ديداناً مفلطحة Flatworms، وهي حيوانات بسيطة، لكنها مع ذلك حيوانات، فبالمقارنة بأي ميكروب، لا يوجد حيوان يمكن تسميته بسيطاً. فقد قام روث بخفض محتوى الأكسجين الذي كانت تتنفسه هذه الديدان، وهي تحتاج إلى الأكسجين، مثل الحيوانات كلها، بل وتحتاج إلى كثير منه. ومع انخفاض محتوى الأكسجين الذاهب في الوعاء المغلق Closed Vessel المُتاح للديدان المحصورة فيه، أبطأت هذه الديدان حركتها تدريجياً ثم توقفت تماماً عن الحركة. ولم تتمكن أي استثارة من إحداث أي نوع من رد الفعل. ولكن روث لم ينهِ التجربة هنا، بل تابع تقطير الأكسجين في ماء الديدان فعادت إلى الحياة.[3] وقد دخلت الديدان المفلطحة حالة من «الهمود» أو «السكون» Dormancy ليست فيها حيّة ولا ميتة. وهكذا، يبدو أنّ الحياة والموت حالتان أكثر تعقيداً بكثير مما يعتقده معظمنا حالياً.

الحياة والموت في أبسط الكائنات الحية

الثديات هي من بين المجموعة الأكثر تعقيداً بين الحيوانات كلها. وحتى في هذه التجارب، وهي مثيرة للاهتمام كما هي، كانت الكائنات المختبرة على قيد الحياة بوضوح: قلوبها ما زالت تنبض، والدم مستمر بالجريان ضمن الأوردة والشرايين، والأعصاب تطلق الإشارات العصبية، كما استمرت وظيفة بنقل الشوارد الضرورية للحياة، حتى وإن كان

ذلك كلّه يتمّ بمعدلات أبطأ. ولكن الأسئلة بقيت حول الوظائف الحيوية في الكائنات الحية الأقل تعقيداً والأبسط مثل البكتيريا Bacteria والفيروسات Viruses، وخصوصاً عندما توضع في بيئة خالية من الغاز أو في بيئة شديدة البرودة. وهذه ليست أسئلة نظرية لأنه في كل يوم تُقذف الميكروبات تجاه السماء إلى المستويات الأعلى من الغلاف الجوي Atmosphere للأرض بفعل العواصف العاتية، وتجد نفسها مرتفعة جداً بحيث لم تعد طبقة الأوزون الحامية للأرض - دفاعنا الرئيس ضد الأشعة فوق البنفسجية القادمة من الفضاء - تستطيع حمايتها. وهذا هو الحد الثاني في دراسة الحياة والموت: دراسة الحياة الأعلى عن الأرض.

وبعد قضاء أيام وأسابيع في الطبقات العليا من الغلاف الجوي Upper Atmosphere، تعود إلى الأرض هذه العناصر من النظام البيئي الأحدث المكتشف على الأرض، ذلك النظام الذي سُمّي بطريقة غير ماهرة من قبل العلماء الذين يدرسون الآن الكائنات الحية في الغلاف الجوي السفلي (التروبوسفير Tropospheric Biota) بالحياة العالية "High Life".[4] ولكن السؤال يبقى: هل كانت على قيد الحياة عندما كانت في الفضاء؟

وبينما كان معروفاً منذ فجر عصر الفضاء Space Age أنه يمكن العثور على أبواغ Spores البكتيريا والفطريات في أعلى الارتفاعات التي تستطيع الطائرات بلوغها، فإنه كان هناك القليل جداً من الإدراك للعدد الحقيقي من الأنواع المختلفة التي قد توجد في أكبر الموائل الطبيعية (المواطن) Habitats الأرضية هذا، فحجم الفضاء قزّم تماماً حجم ثاني أكبر الموائل: المحيطات من السطح إلى القاع. ولكن عملاً بدأ في عام 2010 أظهر أنه في أي وقت من الأوقات قد يوجد الآلاف من أنواع البكتيريا والفطريات وأصناف فيروسية لا تعدّ ولا تحصى. واكتشف أيضاً فريق من جامعة واشنطن، عن طريق الهواء المستنشق على قمة جبل في شلالات أوريغون، أنّ العواصف الغبارية الصينية تُسقط روتينياً الفطريات والبكتيريا والفيروسات على الساحل الغربي لشمال أمريكا.[5]

وبعيداً عن الاهتمام البيولوجي الجوهري بإمكانية وجود الميكروبات عالياً جداً في الغلاف الجوي (أو إمكانية اعتبار الغلاف الجوي نظاماً ناقلاً يرسل إلينا الأسلحة الفيروسية عبر القارات)، فهناك فهم جوهري جديد هو جزء من قصة هذا الكتاب: ربما يكون نقلُ الحياة عبر الغلاف الجوي Atmospheric Transport طريقةَ نثر الحياة الأولى على الأرض بعيداً عن مكان نشوئها. فلماذا يطفو أحدٌ ما ببطء في المحيط أسيراً للأمواج

والتيارات المتقلبة، عندما يستطيع القفز من قارة إلى قارة عبر الهواء في أقل من يوم. سنعود لاحقاً إلى الآثار المترتبة للحياة العالية في تاريخ الحياة على الأرض. فالقضية هنا هي ما إذا استمرت الكائنات على قيد الحياة خلال رحلتها العابرة للقارات عبر الغلاف الجوي، أم إنها كانت في حالة الهمود. ونجد هنا، وفي هذا النوع القاعدي من الحياة بشكل أساسي، أن فئات الحياة والموت غير مكتملة الى حد ما، إذا لم تكن مفاهيم مخادعة.

تُجمع عيّنات الحياة العالية عبر ثلاث طرق: من الطائرات الحربية الأمريكية الخارجة من الخدمة والمخصصة للتجسس من ارتفاعات عالية، ومن مناطيد الارتفاعات العالية، ومن العواصف الكبرى التي تغادر آسيا وتعبر المحيط الهادي و"تصدم" الغلاف الجوي كفاية بحيث يتمكن مستنشقو الهواء على الجبال العالية من حمل نفحة من هواء الغلاف الجوي السفلي (التروبوسفير) المنحدر. وتوجد في ذلك الهواء حديقة ممتلئة بالحياة الميكروبية. وعندما تُجمع من ارتفاعات جوية هائلة، حيث يُعرَفُ الآن أن الخلايا والفيروسات موجودة بشكل اعتيادي، تكون البكتيريا ميتة، لكنها تعود إلى الحياة عندما تُعاد مجدداً إلى الأرض وتُعطى بعض الوقت للتفاعل مع الارتفاع الذي يفترض أنها تطورت فيه.

وسيتفق معظمنا على أن الموت هو الموت بالنسبة إلى الثدييات، وربما جميع الحيوانات. لكنّ هذا ليس حال الحياة الأبسط. فقد اتضح وجود حيز واسع جديد يتعين استكشافه بين فهمنا التقليدي لما هو حي وما هو غير حي. ولهذه المنطقة (الحيز) المكتشفة حديثاً مقتضياتها المهمة على الفصل الأول من تاريخ الحياة على الأرض، وتخبرنا بما إذا كان ممكناً أن تصبح المواد الكيميائية "الميتة" على قيد الحياة عندما تُجمع وتُنشط بطريقة صحيحة. فالحياة، الحياة البسيطة على الأقل، ليست دائماً على قيد الحياة (حيّة)، ويسعى العلم الآن إلى معرفة ما إذا كانت توجد منطقة (حيز) بينهما. فمن المحتمل أن أول حياة على الأرض جاءت من المنطقة التي نسميها الموت أو من منطقة ما أقرب لأن تكون على قيد الحياة.

تعاريف الحياة

سؤال "ما الحياة؟" هو عنوان للعديد من الكتب، وأكثرها شهرة هو الكتاب الذي ألفه الفيزيائي إروين شرودينغر Erwin Schrödinger في أوائل القرن العشرين.[6] فقد كان هذا الكتاب الصغير علامة فارقة، ليس بسبب الموضوع الذي تناوله فحسب،

بل أيضاً بسبب المنهجية العلمية لمؤلفه. وكان شرودينغر فيزيائياً، وقد كانت دراسة علم الأحياء، قبل حياته وفي أثنائها، موضع ازدراء من قبل علماء الفيزياء على اعتبار أنه لا يستحق الدراسة. فقد بدأ شرودينغر بالتفكير في الأحياء الدقيقة كما ينبغي للفيزيائي أن يفعل، وبالمصطلحات الفيزيائية: "إن ترتيب الذرات في الأجزاء الأكثر حيوية من الكائن الحي والتآثر بين هذه الترتيبات يختلفان جوهرياً عن ترتيبات الذرات كلها التي جعلها الفيزيائيون والكيميائيون حتى اليوم موضوعاً لأبحاثهم التجريبية والنظرية." وبينما تعامل معظم الكتاب مع طبيعة الوراثة والطفرات (كُتِبَ هذا الكتاب قبل عشرين سنة من اكتشاف الحمض النووي الريبي منقوص الأكسجين DNA، عندما كانت طبيعة الوراثة لغزاً محيراً)، درس شرودينغر في آخر الكتاب فيزيائية "العيش") عندما كتب: "تتهرب المادة الحية من الاضمحلال إلى التوازن،" والحياة "تتغذى بالإنتروبية السلبية Negative Entropy."

وتقوم الحياة بهذا عبر الاستقلاب، وبوضوح عبر الأكل والشرب والتنفس أو تبادل المواد، والذي يشكل جذر الكلمة في تعريفها اليوناني الأصلي. فهل هذا هو مفتاح الحياة؟ ربما يكون كذلك، بالنسبة إلى عالم الأحياء على الأقل. لكن شرودينغر، الفيزيائي، قال شيئاً أكثر عمقاً بكثير: "أن يكون تبادل المواد هو الأمر الأساسي هي مقولة سخيفة؛ فأي ذرة من النيتروجين والأكسجين والكبريت... إلخ جيدةٌ كأي ذرة أخرى من نوعها. فما الفائدة التي يمكن تحقيقها من تبادلهما." إذن، فما هو ذاك "الشيء" الثمين الذي نسميه الحياة، والموجود في طعامنا، ويحفظنا من الموت؟ الإجابة سهلة بالنسبة إلى شرودينغر: "كل عملية، أو حدث، تجري في الطبيعة تعني زيادة إنتروبية الجزء من العالم الذي تحدث فيه، ومن ثَمَّ فالكائن الحي يزيد إنتروبيته باستمرار." إذن، فقد كان هذا هو سرّ الحياة: كانت الحياة مادة (مسألة) خلقت زيادة في الإنتروبية، وتمّ بذلك ابتداع طريقة جديدة لمقارنة العيش باللاعيش.

إذن، تمّ الحفاظ على الحياة وفق شرودينغر عن طريق استخلاص النظام (الترتيب) من البيئة، شيءٌ ما أسماه (مع الاعتراف الشخصي بأنه تعبير صعب) "الإنتروبية السلبية". فقد كانت الحياة هكذا كجهاز حافظت من خلاله أعداد كبيرة من الجزيئات على نفسها بدرجة عالية من ترتيب متناسب عن طريق ارتشاف مستمر لهذا الانتظام من محيطها البيئي. وأوحى شرودينغر أن الكائنات الحية لم تخلق نظاماً من الاضطراب فحسب، بل خلقت أيضاً نظاماً (ترتيباً) من النظام.

هل هذا هو كل ما يتعلق بماهية الحياة: آلة تغير طبيعة الاضطراب والترتيب (النظام)؟ من وجهة نظر الفيزياء، يمكن فهم الحياة كسلسلة من الآلات الكيميائية المحزومة معا على نحو متكامل لتحافظ على الترتيب عبر صرف الطاقة اللازمة للقيام بذلك. وكان هذا، على مدى عقود، هو الرأي الأكثر تأثيراً في كل ما يتعلق بتعريف الحياة. لكنّ آخرين شرعوا بعد نصف قرن في التشكيك في هذه الآراء وتعديلها. وكان بعضهم مثل شرودينغر من الفيزيائيين، مثل بول ديفيس Paul Davies وفريمان دايسون Freeman Dyson، ولكن بعضهم الآخر كان من البيولوجيين الخبيرين.

وفي كتابه المعجزة الخامسة *The Fifth Miracle*، قارب بول ديفيس[7] السؤال عن ماهية الحياة عبر استخدام سؤال مختلف: ما الذي تفعله الحياة؟ إنها الأفعال التي تعرّف الحياة وفق ادعائه، وهذه الأفعال الرئيسة هي كما يأتي:

الحياة تستقلب *Life metabolizes*. الأحياء كلها تعالج المواد الكيميائية، فتجلب بذلك الطاقة إلى أجسادها. لكن ما فائدة هذه الطاقة؟ إن معالجة Processing الطاقة وتحريرها من قبل كائن حي هو ما ندعوه بالاستقلاب (الأيض) Metabolism، وهما الطريقتان اللتان تحصد بهما الحياة الإنتروبية السلبية الذي تحتاج إليه للمحافظة على النظام (الترتيب) الداخلي. والطريقة الأخرى للتفكير في هذا هي ما يخص التفاعلات الكيميائية. فإذا انتقل الكائن الحي من هذه الحالة من أداء التفاعلات الكيميائية من تلقاء نفسه (وليس في جسم الكائن الحي) إلى حالة يتوقف فيها التفاعل، فإن الكائن الحي قد توقف عن كونه على قيد الحياة. فالحياة لا تحافظ على هذه الحالة غير الطبيعية فحسب، بل وتسعى إلى بيئات يمكنها فيها إيجاد الطاقة اللازمة للبقاء في هذه الحالة وحصدها. وبعض البيئات على الأرض أكثر سهولة للانقياد لكيمياء الحياة من غيرها (مثل سطح المحيط الدافئ المضاء بنور الشمس الساطع على شعب مرجاني Coral Reef أو ينبوع حار في حديقة يلوستون الوطنية Yellowstone National Park)، وفي مثل هذه الأماكن نجد الحياة بوفرة.

الحياة تتصف بالتعقيد والتنظيم. لا توجد حياة بسيطة حقاً، تتألف فقط من حفنة (أو حتى بضعة ملايين) من الذرات. فكل أنواع الحياة تتألف من أعداد هائلة من الذرات تصطف بطرق معقدة. وتنظيم هذا التعقيد هو العلامة الفارقة المميزة للحياة. فالتعقيد خاصية وليس آلة.

الحياة تتكاثر. وضع ديفيس نقطةً تقول : إنّ الحياة يجب ألا تصنع نسخة من نفسها فحسب، بل ومن الآليات التي تسمح بالنّسخ لاحقاً؛ وحسب ديفس، فالحياة يجب أن تملك نسخة من جهاز النسخ أيضاً.

الحياة تتنامى. بمجرد صناعة النسخة، تستمر الحياة بالتبدل، ويمكن تسمية هذا بالنماء. وهذه العملية هي تماماً إلغاء للتشابه مع الآلة. فالآلات لا تنمو ولا تتغير في الشكل أو في الوظيفة مع ذلك النمو.

الحياة تتطور. وهذه إحدى الخصائص الأكثر جوهرية للحياة، وهي الجزء الصميمي من وجودها. وقد وصف ديفيس هذه الخاصية كمفارقة الديمومة والتغير. فالجينات يجب أن تستنسخ Replicate، وإذا لم تستطع فعل ذلك بتنظيم فائق، سيموت الكائن الحي. ولكن، من ناحية أخرى، إذا كان الاستنساخ مثالياً فلن يوجد أي تنوّع Variation، ولا يمكن للتطور Evolution عبر الانتخاب (الاصطفاء) الطبيعي أن يحدث بأي حال من الأحوال. فالتطور هو مفتاح التكيف، ودون التكيف لا وجود للحياة.

الحياة المستقلة *Autonomous*. قد يكون تعريف هذه الصفة هو الأصعب، لكنها مركزية فيما يخص البقاء على قيد الحياة. فالكائن الحي استقلالي، ويمتلك تحديداً ذاتياً، ويمكنه أن يعيش دون مُدخلات مستمرة من كائنات حية أخرى. ولكن تبقى لغزاً كيفية اشتقاق "مستقلة" من العديد من الأجزاء والأعمال للكائن الحي.

الفعل والبنية Action and constitution هما أمرٌ واحدٌ والشيء ذاته بالنسبة إلى النظام الحي. فالنظام يتألف من توليد مستمر (وإعادة توليد: يعيش البروتين نحو يومين فقط) لجميع العمليات والمكونات التي وضعها معاً في وحدة عملياتية. ومن هذا المنظور، فالتكاثر والتجديد الثابتان لشكل الحياة هما ما يعرّف الحياة نفسها.

لم تأخذ الفكرة الأخيرة هذه، أي المدى الزمني المؤقت للجزيئات الجوهرية للعيش، ومن ثَمّ الحياة، حقها في التقدير كمفتاح رئيس لفهم المكان الأول الذي ربما قد تشكلت الحياة فيه أولاً. إن تعريف وكالة **ناسا** للحياة أبسط، وهو من تعريف يحبّذه كارل ساغان Carl Sagan: الحياة نظام كيميائي قادر على التطور الدارويني.[8] وهناك ثلاثة مفاهيم رئيسة في هذا السياق: الأول، نحن نتعامل مع مواد كيميائية وليس مجرد الطاقة أو أنظمة حوسبة إلكترونية. ثانياً، ليست مركبات كيميائية فقط، بل الأمر يتضمن أيضاً أنظمةً كيميائية، ومن ثَمّ فهناك تأثير متبادل بين المركبات الكيميائية، وليس ضمن المركبات الكيميائية نفسها فقط. وأخيراً، فالأنظمة الكيميائية يجب أن تخضع للتطور الدارويني،

وهذا يعني أنه إذا وُجد في البيئة عدد أكبر من الأفراد أكثر من الطاقة المتاحة، فإن بعض هؤلاء الأفراد سيموت، ومن ينجو ويبقى منهم فقد فعل ذلك لأنه حمل صفات وراثية تفضيلية ستورّث إلى ذريته، وهذا يعطي النسل قدرة أكبر على البقاء. ويمتلك تعريف ناسا - ساغان ميزة عدم الخلط بين الحياة وأن يكون الكائن على قيد الحياة.

ما "العامل الدافع" Driver الذي سبّب تجمع المركبات الكيميائية الميتة بمثل هذه الطريقة لتصبح على قيد الحياة؟ فهل كان الدافع الرئيس المؤدي إلى الحياة هو نظاما استقلابيا، وهو فقط الذي اكتسب لاحقاً القدرة على الاستنساخ، أم إن النقيض هو الصحيح؟ لو كانت الحالة الأولى، فإن نظم استقلاب بدائية - ستكون حتماً منغلقة ضمن حيز يشبه الخلية - اكتسبت لاحقاً القدرة على الاستنساخ وإقحام نوع من جزيء حامل للمعلومات. أما في الحالة الثانية؛ فقد اكتسبت جزيئات النسخ مثل (RNA) (الحمض الريبي النووي) أو أحد متغايراته القدرة على استخدام أنظمة الطاقة للمساعدة على نسخها، وصارت لاحقاً فقط منغلقة ضمن الخلية. وهكذا، فنحن أمام تباين صارخ جداً عندما تطرح مشكلة الاستقلاب بمواجهة النسخ هذه على المستوى الجزيئي - الكيميائي: فهل كانت البروتينات أولاً؟ أم الأحماض النووية أولاً؟ هل أي منهما على قيد الحياة؟ وعند أي نقطة عبر كل منهما من تفاعل كيميائي إلى التفاعلات الكيميائية التي تغذي الحياة؟ وحتى الآن، إذا كانت السمة الأساسية للخلية الحية هي الاستتباب Homeostasis، أي القدرة على المحافظة على الاستقرار وتوازن كيميائي ثابت أكثر أو أقل في بيئة متغيرة، فإنه يترتب على ذلك أن يكون الاستقلاب أولاً. ويبدو أن الأكل قبل التكاثر هو الرأي المقبول في الوقت الحاضر، لكنّ أسئلةً تبقى معلّقةً كما هي الحال عند التعامل مع أصل الحياة.

الطاقة وتعريف الحياة

يمكن الآن إضافة الدور الذي تؤديه الطاقة في صيانة الحياة إلى تعريفنا للحياة. فقد عرّفنا الحياة للتو بالاستقلاب والاستنساخ والتطور. ولكن دعونا لا نتصور الحياة من باب تدفق الطاقة وتواصل الفوضى والترتيب. ومن الواضح تماماً أنّ امتلاك الطاقة وحده غير كاف كأساس للحياة؛ فلابد من التآثر مع الطاقة، وهذا التآثر على المستوى القاعدي جداً مطلوبٌ لصيانة حالة من الترتيب غير المتوازن. ومن دون الطاقة تتحول الحياة إلى لا حياة، ولذلك يجب أن تكون الحياة شيئاً ما تعريفه يقترن باكتساب

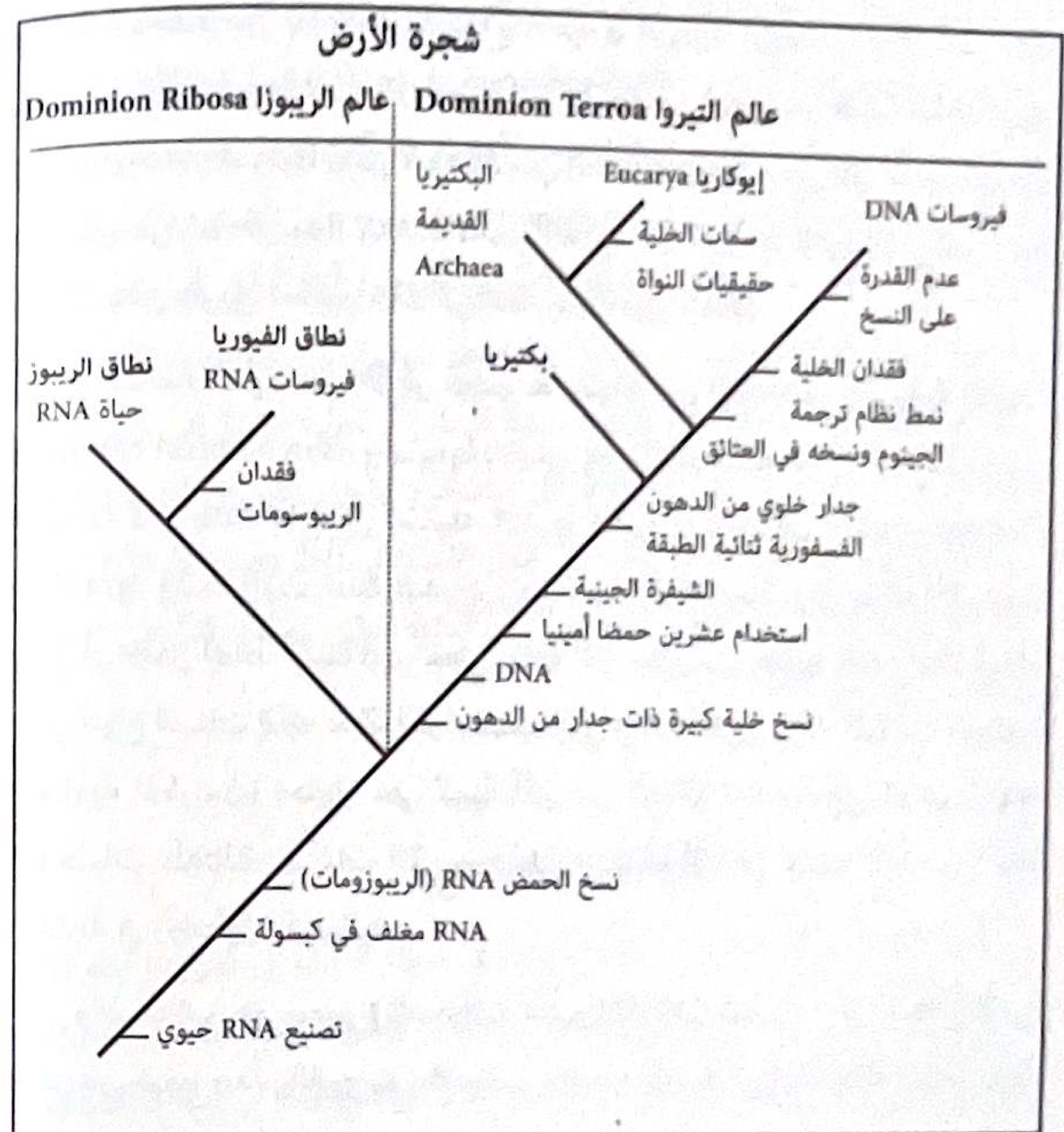
الطاقة وتفريغها. والحياة تصون نفسها بامتلاك حالات تسمح لها بأن تصبح تدريجياً أكثر تنظيماً من خلال مُدخل جريان الطاقة. ويقوم نوعنا من الحياة بذلك من خلال المحافظة على كميات قليلة نسبياً من توليفات من الكربون والأكسجين والنتروجين والهيدروجين (وبعض العناصر الأخرى بكميات أقل). وفي نهاية المطاف يتمّ التوصل إلى درجة ما من التعقيد والتكامل وصيانتها، وهذا هو ما نسميه الحياة. وتدفق الطاقة إلى الداخل يجب أن يكون كافياً للتغلب على ميل الكيمياء ضمن الجسم الذي نسمّيه الحياة للعودة إلى حالة التوازن - والتي هي اللاحياة.

أحد تعريفات الحياة المقبول عالميا هو أنها تستقلب. وبالنسبة إلى الحياة على الأرض، فالمصادر الأولية للطاقة هي من حرارة الأرض أو من الشمس، وهي بحد ذاتها الطاقة الناجمة عن تفاعلات الاندماج الحراري النووية الشمسية. وإلى حد بعيد، فالطريقة الأكثر شيوعاً لاستغلال الحياة للطاقة الشمسية هي عبر عملية البناء الضوئي Photosynthesis، وفيها يُؤمّن ضوء الشمس الطاقة اللازمة لتحويل ثاني أكسيد الكربون والماء الى مركبات كربونية معقدة تحوي العديد من الروابط الكيميائية التي تخزن الطاقة. وعن طريق تحطيم هذه الروابط، يتمّ تحرير الطاقة.

وتستخدم الحياة على الأرض مجموعة متنوعة من التفاعلات الكيميائية الحيوية Biochemical reactions، وجميعها يتضمن نقل الإلكترونات. لكنّ هذا النظام يعمل فقط إذا كان هناك ما يمكن تسميته التدرج الكهربائي الكيميائي Electrochemical gradient: وكلما زادت حدة التدرج، زادت إمكانية الحصول على طاقة أكثر. وهذا يعني أن بعض أنماط الاستقلاب تعطي طاقة أكثر بكثير من بعضها الآخر، تماماً كما أن بعض أنواع البيئات تملك طاقة أكثر لحصدها من بيئات أخرى. وأكثر المركبات العضوية (الحاوية للكربون) احتواء على كمية أكبر من الطاقة المخزنة هي الدهون Fats والدهنيات Lipids، المركبات الكربونية طويلة السِلسِلَة التي تمتلك كثيراً من الطاقة المختزنة في روابطها الكيميائية.

والاستقلاب هو مجموع التفاعلات الكيميائية التي تحدث داخل الكائن الحي. فالفيروس صغير جداً، والفيروسات النموذجية تقيس أقطارها بين 50 و100 نانومتر (نم)، حيث "نم" أو nm (النانومتر) يساوي 10^{-9} متر. وتأتي هذه الفيروسات في نوعين عامين: تكون إحدى المجموعتين مغلفةً ضمن إطار من البروتينات، وتتغلف الثانية في إطار بروتيني مع غلاف إضافي شبيه بالغشاء. وضمن هذا الغلاف يوجد القسم الأكثر أهمية من الفيروس، إنه جينومها (مجينها) Genome المكوَّن من الحمض النووي الذي يتألف

في بعضها من الحمض النووي DNA وفي بعضها الآخر من الحمض النووي RNA. وكذلك يختلف عدد الجينات كثيراً، فبعضها يمتلك عدداً قليلاً (ثلاثة جينات) وبعضها الآخر، مثل فيروس الجدري Smallpox، يمتلك أكثر من 250 جيناً مفرداً. ويوجد في الحقيقة تنوع كبير من الفيروسات، وفي حال اعتُبِرت على قيد الحياة، ستُصنف عبر توزع تصنيفي كبير، لكن العرف العام يعاملها على أنها ليست من الأحياء. والفيروسات التي تحتوي على الحمض النووي RNA فقط تظهر أنه بحد ذاته، وبغياب الحمض النووي DNA، قادر على تخزين المعلومات، ويخدم كجزيء DNA فعلي.[9] وتعتبر هذه الموجودة دليلاً قوياً على «عالم من RNA»[10] ربما كان قائماً قبل نشأة الحمض النووي DNA والحياة كما نعرفها. وهناك حتى مقتضيات أكثر إثارة للانتباه لوجود الفيروسات الرنوية RNA viruses.



نسختنا المنقحة لشجرة الحياة والتي تتضمن الفيروسات وحياة الحمض النووي RNA التي انقرضت الآن. وهذا يتطلب فئة تصنيفية جديدة، الفئة التي هي أعلى من النطاقات Domains (التي هي أعلى الممالك). إن حياة الحمض النووي RNA غير قابلة للتعريف الآن في شجرة الحياة المقبولة حالياً. (عن بيتر وورد، الحياة كما لا نعرفها، 2006). (Peter Ward, *Life As We Do Not Know It*, 2006)

والفيروسات طفيلياتٌ Parasites، وهي تُدعى تقنياً طفيليات مجبرة داخل خلوية Obligatory intracellular parasites؛ لأنها غير قادرة على التكاثر دون خلية مضيفة (الثوي). وفي معظم الحالات ترتشح الفيروسات في خلايا الكائنات الحية وتستغل عضيات تشكيل البروتين وتبدأ بصنع المزيد من النسخ منها، فتحول الخلايا التي تعرضت للغزو إلى مصانع لإنتاج الفيروس. وللفيروسات تأثيراتها البالغة في بيولوجيا الخلايا المضيفة لها.

والحجة الكبرى ضد اعتبار الفيروسات على قيد الحياة هي حقيقة أنها غير قادرة على الاستنساخ بمفردها - ومن ثَمّ فهي على ما يبدو تفشل في هذا الاختبار الرئيس لكون الشيء حياً أم لا. ولكن من الواجب تذكر أنّ الفيروســات طفيليات مجبرة والطفيليات تميل إلى الخضوع لتغيرات شكلية وجينية جوهرية للتكيف مع مضيفيها.

يمكننا أيضاً أن نسأل عما إذا كانت الطفيليات الأخرى على قيد الحياة. فالتطفل، وهو في جوهره شكل متطور جداً من الافتراس، جاء عموماً نتيجة لتاريخ طويل من التطور. والطفيليات ليست مخلوقات بدائية، لكنها مثل فيروساتنا، مرت بمراحل لا تبدو أنها كانت خلالها على قيد الحياة تماماً. وكريبتوسبوريديوم *Cryptosporidium* والجيارديا *Giardia* كلاهما يتطفل على البشر والثدييات الأخرى، وهما يمران بمراحل من الركود يكونان فيها ميتين مثل أي فيروس خارج مضيفه تماماً. ودون المُضيف، لن يعيش هذان الكائنان (وكذلك آلاف من الأنواع الأخرى)، وربما لا يمكن تصنيفها ككائنات حية، ومع ذلك، فحينما تعود إلى مضيفها، فإنها تبدي سمات الحياة كلها كما نعرفها. فهي تستقلب وتتكاثر وتخضع للانتخاب الدارويني. ولكن إذا قبلنا أن تلك الفيروسات على قيد الحياة، وهذا القبول يتزايد باطراد؛ فلابد لنا من إعادة تقييم جذرية لشجرة الحياة كما هي مقبولة حاليا.

وفي دراسة الحياة على الأرض، يمكن طرح سؤالين اثنين: ما هو أبسط تجمع للذرات يكون على قيد الحياة؟ وما هو أبسط شكل من أشكال الحياة على الأرض، وماذا يحتاج إلى البقاء حياً؟ وللإجابة عن هذين السؤالين يجب أن ننظر إلى ما تحتاج إليه الحياة الأرضية لتبلغ حالة الحياة الموصوفة سابقا وتحافظ عليها. وللقيام بذلك يجب النظر باختصار في كيمياء المواد التي تستخدمها أشكال الحياة الأرضية كلها لبلوغ الحياة، ومن ثم الحفاظ عليها.

لبنات البناء غير الحية للحياة الأرضية

ومن بين الجزيئات التي تشكل الحياة الأرضية، ليس هناك ربما ما هو أهم من الماء. فالماء يكون في طور واحد: يجب أن يكون الماء سائلاً وليس جليداً أو بخار ماء (غازاً). وتتألف حياة الأرض من جزيئات تسبح في سائل، وبينما يكون عدد الجزيئات التي يمكن العثور عليها في الحياة كبيراً بشكل مذهل، فالواقع يقول بوجود أربعة أنواع رئيسة من الجزيئات فقط تستخدمها الحياة الأرضية: الدهنيات والسكريات (الكربوهيدرات) والأحماض النووية والبروتينات. وكلها إما مغمورة في سائل، وهو الماء الذي يذيبها في هذه الحالة، أو أنها تخدم كجدار خارجي لاحتواء باقي الجزيئات والماء.

الدهنيات، ما ندعوه الدهن، هي مقومات رئيسة في الأغشية الخلوية Cell membranes في الحياة الأرضية. فهي مقاومة للماء بسبب وفرة ذرات الهيدروجين، لكنها تحوي عدداً قليلاً من ذرات الأكسجين والنتروجين. والدهون هي المكونات الأكبر لحدود الخلية أو جدارها الذي يفصل البيئة الخارجية عن الداخل المملوء بالسائل، والذي نسمّيه الحياة. وهذه الأغشية، وعلى الرغم من دقتها وحساسيتها، تؤمّن ضبط المواد الداخلة إلى الخلية والخارجة منها.

والكربوهيدرات هي الفئة الرئيسة الثانية من البنى التي تتألف منها الحياة الأرضية، وهي ما ندعوه بالعامية بالسكريات. وبربط عدد منها معاً، يمكننا تشكيل عديدات السكاريد Polysaccharide الذي يعني "العديد من السكريات". والسكريات، سواء أكانت مرتبطة أم أحادية، هي لبنات (وحدات) بناء مهمة، إذ يمكن أن تتجمع فيما بينها أو مع جزيئات عضوية أو غير عضوية أخرى لتشكيل جزيئات أكبر.

والسكريات مهمة أيضاً في تشكيل الفئة التالية من وحدات البناء، أي الأحماض النووية. وهذه المجموعة تحتوي على المعلومات الجينية المخزونة لأي خلية. والأحماض النووية هي جزيئات عملاقة تجمع السكريات ومركبات حاوية للنتروجين تدعى النيوكليوتيدات تتشكل هي نفسها من وحدات فرعية تدعى القواعد والفوسفور والمزيد من السكريات. وفي هذا الترتيب تكون القواعد بالغة الأهمية لأنها تصبح الحروف فيما يسمّى شفرة جينية Genetic code.

والحمض النووي DNA والحمض النووي RNA هما سكريات تعد من بين أكثر جزيئات الحياة أهمية. والحمض النووي DNA ، وهو المكون من هيكلين (اللولب المزدوج Double Helix الشهير الذي وصفه مكتشفاه جيمس واتسون James Watson وفرانسيس كريك Francis Crick)، هو نظام حفظ المعلومات للحياة نفسها. ويرتبط هذان اللولبان معا عبر سلسلة من النتوءات كدرجات السلم، وتتكون من قواعد Bases الحمض النووي DNA المميزة، أو أزواج القواعد: الأدينين Adenine والسيتوزين Cytosine والغوانين Guanine والثيمين Thymine. ويأتي مصطلح "زوج القاعدتين النيتروجيتين" Base pair من حقيقة أنّ هذه القواعد ترتبط دائماً فيما بينها: يتزاوج السيتوزين دائما بالغوانين، ويرتبط الثيمين دائماً بالأدينين. ويؤمن ترتيب أزواج القواعد لغة الحياة: وهي الجينات التي ترمز لكل المعلومات عن شكل معين من أشكال الحياة.

وإذا كان الحمض النووي DNA هو حامل المعلومات، فالمتغاير أحادي السِلْسِلة منه، ويدعى RNA، هو عبده، وهو الجزيء الذي يترجم المعلومات إلى فعل - أو في حالة الحياة، إلى إنتاج فعلي للبروتينات. وجزيئات الحمض النووي RNA مشابهة للحمض النووي DNA في وجود اللولب والقواعد النيتروجية، لكنها تختلف عادةً (لكن ليس دائماً) بكونها مؤلفة من سلسلة واحدة أو لولب وحيد بدلاً من اللولب المزدوج للدنا.

ولكن، لماذا هذا التعقيد الهائل في الحمض النووي DNA وRNA؟ تكمن الإجابة في الحاجة إلى معلومات للقيام أولاً ببناء (مخطط تفصيلي) للعديد من المهام التي يتطلبها البقاء على قيد الحياة، ومن ثم صيانتها. فالحمض النووي DNA هو المخطط التفصيلي ودليل التعليمات ودليل التصليح والتوجيهات لبناء نسخ منه ومن كل ما يرمّز له. وبمصطلحات الحاسوب، الحمض النووي DNA هو البرمجيات Software، فهو يحمل المعلومات لكنه لا يستطيع العمل بنفسه عليها. أما البروتينات؛ فيمكن اعتبارها كمعدات (عتاد) الحاسوب، فهي تحتاج إلى برمجيات الحمض النووي DNA لتوفير المعلومات حول الزمن والمكان لحدوث التغيرات الكيميائية النوعية، وإنتاج مادة ضرورية للحياة. ويتميز الحمض النووي RNA بخاصية مثيرة تكمن في إمكانية أن يعمل كبرمجيات أو كعتاد، أو كليهما في الوقت نفسه في بعض الحالات.

وتقوم البروتينات، وهي لبنات (وحدات) البناء الأخيرة، بأربع وظائف في الحياة الأرضية: بناء جزيئات أخرى أكبر، وتصليح باقي الجزيئات، ونقل المواد، وتوفير إمدادات الطاقة. كما تقوم البروتينات بتعديل الجزيئات الكبيرة والصغيرة لتناسب غايات متنوعة، وتشارك في الإشعار الخلوي. ويوجد عدد ضخم من مختلف البروتينات، ونحن فقط نتعلم حاليا كيفية عملها ودورها. وتشير الرؤية الجديدة إلى أنّ طوبوغرافية البروتينات، أو نمط تطويها، لا تقل أهمية عن تركيبها الكيميائي بالنسبة إلى وظيفتها.

البروتينات المستخدمة في الحياة الأرضية كلها تتشكل من تجمع عشرين حمضاً أمينياً هي ذاتها. ومجال البحث الحديث في القرن الحادي والعشرين عاد وطرح المعضلة القديمة: هل هذه الأحماض الأمينية العشرين هي التي استخدمت نفسها لأنها لبنات البناء الأفضل الموجودة - أم لأنها كانت شائعة في المكان الذي تشكلت فيه الحياة للمرة الأولى فأصبحت مرمزةً دائماً في الحياة؟ في الواقع، يبدو أن الجواب هو الخيار الأول؛ إنها تعمل بالشكل الأمثل، على الأقل وفق بحث أجري عام 2010. فهذه المجموعة نوعية للأرض، وربما هي واسمةٌ للحياة الأرضية.

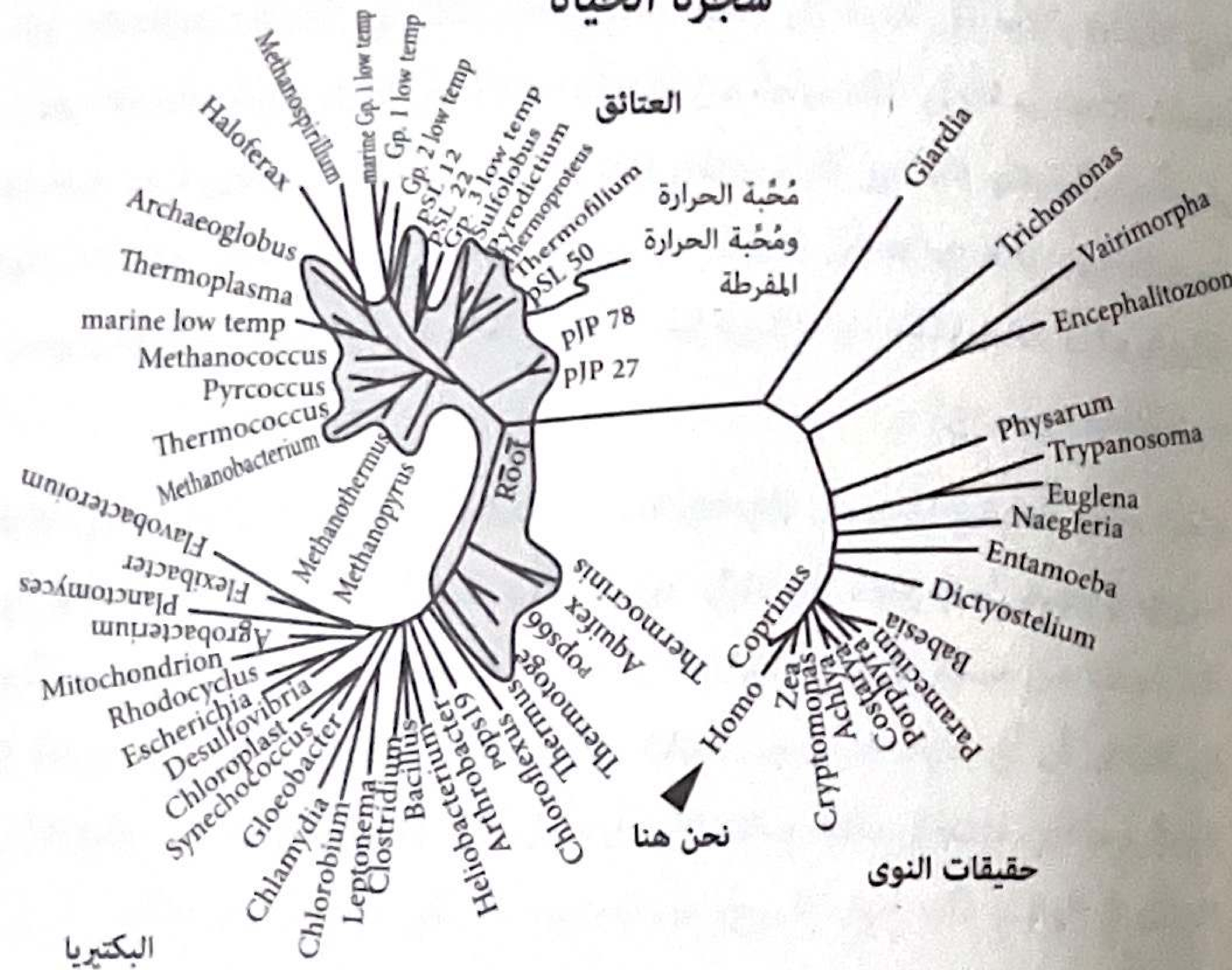
تُبنى البروتينات ضمن الخلية عن طريق الربط بين الأحماض الأمينية Amino acid المختلفة في سلسلة طويلة خطية تنطوي في شكلها النهائي فقط عندما تكون أحماضها الأمينية كلها قد ارتبطت فيما بينها. وفي بعض الأحيان تنطوي بينما لا تزال عملية بنائها مستمرة. ولأن تجميع الأحماض الأمينية إلى بروتين ما يحدث بإضافة حمض أميني في كل مرة، وبترتيب خطي نوعي، فإنه غالباً ما يُشبّه ذلك البروتين بجملة مكتوبة، يكوّن فيها كل حمض أميني كلمةً واحدة. وفي داخل جدرانها الخلوية، تكون الخلية الحية مجمعة بحيث تكون الجزيئات المنتظمة في شكل قضبان وكرات وصفائح جميعها طافية في هلام ملحي. ويوجد نحو ألف حمض نووي وأكثر من ثلاثة آلاف بروتين مختلف، وهذا كله يجري في نوع ما من الكيمياء لتتشكل من هذا الخليط العمليةُ التي ندعوها الحياة. ويمكن للعديد من العمليات الكيميائية أن تُجرى متزامنة في الوقت ذاته في هذا البيت أحادي الغرفة.

وتوجد أيضاً نحو عشرة آلاف كرة مفردة داخل الخلية تدعى الريبوسومات أو (الجسيمات الريبية) Ribosomes، وهي تتوزّع بالتساوي في أنحاء الخلية. وتتشكل الريبوسومات من ثلاثة أنواع مميزة من الحمض النووي RNA ونحو خمسين نوعاً

من البروتينات. كما توجد الكروموسومات (الصبغيات) في الخلية، وهي سلاسل طويلة من الحمض النووي DNA ترتبط ببروتينات نوعية. ويتموضع الحمض النووي DNA في البكتيريا عادة في مكان واحد من الخلية، لكن هذا المكان غير مفصول عن باقي المادة الداخلية بغشاء بلازمي كما هي الحال في الأشكال الأعلى في الحياة والمعروفة بحقيقيات النوى Eukaryotes والتي تملك نواة داخلية. ويمكن التساؤل هنا ما الذي في هذه الخلية على قيد الحياة؟

تتكون البكتيريا Bacterium من جزيئات جامدة غير حية. وجزيء الحمض النووي DNA هو بالتأكيد ليس على قيد الحياة بأي معنى يمكن لأي شخص عاقل أن يتقبله. والخلية بحد ذاتها مكونة من أعمال كيميائية لا تعد ولا تحصى، وكل منها يحدث وحده، لكنه تفاعل جامد من الكيمياء. إذن، ربما لا يوجد في الخلية شيء على قيد الحياة باستثناء الخلية كلها بحد ذاتها. وإذا أردنا أن نفهم كيفية نشوء الحياة الأولى، فنحن بحاجة إلى إيجاد أدنى خلية يمكن أن تقوم بذلك مع أقل عدد من الجزيئات والتفاعلات.

شجرة الحياة



شجرة الحياة المحتملة كما يُنظر إليها الآن. والمناطق المظللة هي تلك الكائنات التي تزدهر في الحرارة العالية. وما هو مفقود هو ما يفترض أنه العديد من أنواع الكائنات و"ما قبل الكائنات" التي تطورت من الكيمياء غير العضوية خطوة فخطوة نحو إنتاج الخلية الحية الأولى.

وعند النظر إلى هذه الخلية البسيطة، فإحدى المشكلات الملحة هي أنه عند فحصها بالتفصيل، لم تكن بسيطة بأي شكل من الأشكال. وقد بحث فريمان دايسون بوضوح في هذا الجانب من الحياة الحديثة متسائلاً: لماذا الحياة، على الأقل الحياة في يومنا هذا، بالغة التعقيد؟[12] إذا كان الاستتباب سمة أساسية وضرورية للحياة، وإذا كانت البكتيريا المعروفة كلها تحوي بضعة آلاف من الأنواع الجزيئية (مرمزة في بضعة ملايين من أزواج القواعد في الحمض النووي DNA)، فيبدو أن هذا قد يكون الحجم الأدنى للجينوم. ومع ذلك، فالبكتيريا كلها التي تأتينا اليوم جاءت بعد أكثر من ثلاثة (وربما أكثر من أربعة) بلايين سنة من التطور. ولعل الحياة الأرضية الأبسط هي من بين أشكال الحياة الأكثر تعقيداً في الكون.[13]

4

تشكل الحياة: ما بين 4.2(؟)-3.5 بليون سنة مضت

في اليوم الثامن والعشرين من شهر يوليو (تموز) لعام 1976، امتدت ذراع آلية من آلة ضخمة تزن طناً واحداً كانت قبل أيام فقط قد أتمت تحليقاً طويلاً وصامتاً من الأرض إلى المريخ، وهبطت بنجاح هناك. فقد جرفت تلك الذراع تربةً من المريخ وحملته إلى المركبة الفضائية فايكنغ *Viking*. وكان جمع العينة تلك المرة الأولى التي يتحقق فيها مثل هذا الإنجاز الهندسي من على الأرض. وأجرت المركبة فايكنغ، التابعة **لوكالة ناسا**، أربع تجارب أساسية على ذلك الراسب الموجود الآن في داخلها المعقد، وهذه التجارب كلها مصمّمة للبحث عن دليل كيميائي على الحياة أو عملياتها. وكان هذا هو السبب الوحيد لقدوم فايكنغ إلى المريخ: البحث عن الحياة.

زادت التجارب الأولية[1] من الآمال في كون المريخ قد احتوى في تربته فعلياً على الحياة، فسرعان ما وجد أن التربة تحوي الأكسجين أكثر مما كان متوقعاً. وإضافة إلى ذلك، فقد ألمح النشاط الكيميائي للتربة إلى وجود بكتيري على الأقل في Martian regdith. وقد أحدثت التجارب الأولى تلك موجةً من التفاؤل عند فريق علماء فايكنغ لدرجة جعلت واحداً من كبارهم، الدكتور كارل ساغان Carl Sagan، متفائلاً بما يكفي ليخبر صحيفة نيويورك تايمز بأنه يعتقد أن الحياة على المريخ ليست أمراً مستبعداً، حتى بأشكالها الكبيرة، وكان يقصد بذلك حياة كبيرة تماماً، لأنه في المقابلة ذاتها ذهب إلى افتراض وجود دببة قطبية في المريخ!

ولكن راسم الطيف المحمول Onboard spectrograph، وبعد تحليل دقيق لتربة المريخ، لم يتمكن من إيجاد أي دليل على مركبات كيميائية عضوية في التربة. فالمريخ، كما شوهد من مسبار فايكنغ الأول، لا يبدو ميتاً فقط، بل إنه مُعادٍ للحياة؛ مما أدى الى افتراض أن أي حياة قد توجد هنالك ستُقتل حالاً بالمركبات الكيميائية السامة في التربة. وساغان، المتفائل دائماً، يمكنه الآن أن يأمل فقط بأن يتمكن مسبار فايكنغ الثاني، الجائل في الوقت ذاته حول المريخ، من تقديم أدلة تشي بوجود حياة هناك.

وفي 3 سبتمبر عام 1976، هبط المسبار الثاني بالمظلات بأمان على سطح المريخ في مكان يُدعى سهل يوتوبيا Utopia planitia. وكما هي الحال مع المسبار الأول، أدت الآلة الضخمة وظيفتها بشكل مثالي.[2] ولكنْ، وأيضاً كما هي حال المسبار الأول، لم يُعثر على أي

أثر للحياة في أي من تجارب كشفها المنفصلة والحاسمة. فقد كان التصور حول مركبة فايكنغ بأن تكون برنامج استكشاف متعدد، وبينما كانت دراستها لكيمياء وجيولوجيا التربة والغلاف الجوي مهمة، فقد كانت مهمتها الرئيسة ومعظم المعدات التي اكتظت بها المركبة الفضائية المزدحمة، كما ورد سابقا، مخصصة للبحث عن حياة خارج كوكب الأرض.

لقد أوحت نتائج فايكنغ أن المريخ كان عقيماً،[3] وبدأت **ناسا** تفقد اهتمامها بالمريخ لأنها كانت ولا تزال مدفوعةً نحو البحث عن الحياة خارج الأرض. وبدأ خفض اهتمام **ناسا** هذا يعود بالفائدة على فرع آخر من العلوم، الفرع الذي كان عازماً أيضاً على دراسة العوالم الغريبة، وربما الحياة الغريبة: علم المحيطات وعلماؤه.

وفي السنوات التي أعقبت فايكنغ تماماً، فقد أُنفقت مبالغ ضخمة على التقنيات الضرورية لاستكشاف أعماق المحيطات. وسرعان ما حقق نوع آخر من المركبات الفضائية هبوطاً ناجحاً على سطح غريب. إلاّ أنه عُثر على الحياة في هذه الحالة، لكنها من النوع الذي لم يكن متوقعاً البتة. ففي المحيط الأطلسي أولاً، ثم في تعاقب سريع في أعماق البحر قبالة جزر غالاباغوس، ثم في أعماق خليج كاليفورنيا، صورت الغواصة الصفراء الصغيرة (ألفين *Alvin*) نوعاً من الحياة يستخدم مصدراً للطاقة يختلف جذرياً عن أشعة الشمس وأخذت عينات من هذه الحياة.

إنّ اكتشاف حيوانات النفاثات الحرارية المائية Vent faunas هذا في أعماق البحار سيغير جذرياً فهمنا عن زمن وكيفية خروج الحياة على الأرض إلى حيز الوجود. فإذا كانت نشأت أصلاً على الأرض، فهناك احتمال بأن تكون الحياة قد تشكلت في مكان آخر ثم انتقلت إلى الأرض. فإذا تشكلت الحياةُ على الأرض حالاً بعد اندماج أرضنا في كوكب كبير وقابل للسكن بشكل نهائي، فإن ذلك يوحي أن الحياة ليست على الإطلاق ذاك الشيء الذي يصعب صنعه. ولكنْ كم هو عمر أقدم حياة حقاً على الأرض وأين نشأت تلك الحياة الأولى؟

وعندما يحاول المؤرخون العثورَ على بداية أي شيء، فهم عادة يبحثون في سجلات وحدات الزمن الأقدم على الإطلاق، وهذا ما كان عليه الحال مع مؤرخي الأرض. فقد كانت مشكلتهم في قلة الصخور ذات العمر الطويل المناسب، وفي كون التأحفر الفعلي للخلايا الباكرة الشبيهة بالبكتيريا أمراً مستحيلاً تقريباً.

لقد كان بديهياً، لأكثر من عقدين من الزمن، أن أقدم إشارة للحياة على الأرض جاءت من الزاوية المتجمدة في غرينلاند Greenland، في مكان يدعى إسوا Isua.[4] صحيحٌ أنه لم

يُعثر على أي أحفورة، بل مجرد معادن صغيرة دُعيت 'أملاح' الأباتيت Apatite أشير إلى احتوائها على كميات مجهرية من نظيرين مختلفين من الكربون أظهرت نسبتهما شبهاً كبيراً بالنسبة التي هي صفة مميزة للحياة حاليا. وقد قُدّر عمر صخور إسوا، غرينلاند، تقديراً جيداً (نحو 3.7 بليون سنة)، وقد أشار تأريخ جديد لاحق إلى أنها أقدم من ذلك (نحو 3.85 بليون سنة)، وفي الحقيقة هذا هو التاريخ الذي طالما تمّ تدوينه في الكتب.

لقد حمل تاريخ 3.7 إلى 3.8 بليون سنة مضت معنىً كبيراً لأولئك الباحثين عن أقدم حياة على الأرض. فكما رأينا سابقاً، قصفت الكويكبات الأرض بكل شيء في النظام الشمسي الفتيِّ في حينها، وغيرها من الفتات الباقي بعد تشكل الكواكب من نحو 4.2 إلى 3.8 بليون سنة مضت. وقد ذكرنا سابقاً أن الحياة، وبينما يُحتمل أنها قد تشكلت (أو حتى كانت أقدم من هذا)، قد تمّ محوها بعملية "تأثير الصدم"،[5] ولذلك كان عمر صخور إسوا مثالياً؛ فالقصف العنيف كان قد توقف للتو، وأصبح بدء الحياة ممكناً. ولسوء الحظ، فإن المعدات الحديثة المطورة في القرن الحادي والعشرين اكتشفت أن الكمية الصغيرة من الكربون في عينات إسوا غرينلاند لم تتشكل بفعل حياة على الإطلاق.[6]

كانت الحياة التالية الأقدم بعمر 3.5 بليون سنة، واستند الادعاء في هذه الحالة إلى الأحافير، وليس الإشارات الكيميائية فقط. وقد اكتُشِفت أشكال خيطية في صخرة تشبه العقيق أرّخها عالم الأحافير ويليام شوف William Schopf لتكون بعمر نحو 3.5 بليون سنة.[7] وجاءت الأحافير من تجمع سابق غامض وقديم من الصخور تموضعت في واحد من أقل الأمكنة قابلية للسكن على الأرض الحالية، تجمع صخري مشوه جدا يدعى أبيكس شيرت Apex Chert في غربي أستراليا. والموضع الجغرافي الدقيق لهذه الأحافير، في القسم الكبير الجاف الغباري لغربي أستراليا، هو القطب الشمالي North Pole، الاسم الغريب الذي أعطي قبل عدة سنوات؛ لأن الموضع في الواقع واحد من أسخن الأماكن على الأرض، ومختلف تماماً كمكان وجغرافياً، وبشكل خاص مناخياً، عن المنطقة القطبية الشمالية.

وقد حفّز اكتشاف ويليام شوف العلمَ؛ لأنه أظهر أن الحياة على هذا الكوكب بدأت واقعياً باكراً جداً في تاريخ الأرض. ولما يقرب من عشرين عاماً، بقيت مقبولةً هذه الأحافير الأسترالية القديمة كأقدم حياة أحفورية للكوكب، لكنها صارت لاحقاً موضع شك حين ادعى مارتين بريزيير Martin Brasier، من أكسفورد، أن ما يسمّى أقدم الأحافير لم يكن سوى آثار بلورات بسيطة وليس بقايا حياة على الإطلاق.[8]

ما حدث بعد ذلك كان نزالاً علمياً كبيراً، فقد أطلق العلماء من كلا الطرفين هجمات وهجمات مضادة، معظمها مهذب (لكن بعضها أقل تهذيباً). وبعد أخذ وردّ استغرق عدة سنوات، فَقَدَ شوف تدريجياً الأرضية الداعمة له، ليس بسبب هجمات فريق أكسفورد حول تفسير الآثار الصغيرة في أبيكس شيرت فحسب، بل بسبب ما ظهر بعد فترة وجيزة حول عمر أبيكس شيرت بحد ذاتها.

ونحو عام 2005، ادعى روجر بويك Roger Buick، من جامعة واشنطن، أنه حتى إذا كانت الأشياء الصغيرة في أبيكس شيرت هي أحافير أصلاً، فالصخور بحد ذاتها أصغر عمراً بكثير مما قد ادعى شوف، أصغر بأكثر من بليون سنة في الواقع، ومع ذلك فهي تبقى قديمة (أي أحفورية يرتبط ميلادها ببلايين السنين مرشحة لتخفيض هذا العمر الكبير) ولكن بعيداً جداً عن الحياة الأقدم على الأرض. ومع هذه الضربات المزدوجة، فقد خرجت أحافير أبيكس من الحلقة.

استقرت الأمور هكذا حتى صيف 2012، عندما شارك مارتين بريزيير نفسه في كتابة ورقة بحثية[9] تُظهر وجود الحياة الذي يعود على الأقل إلى 3.4 بليون سنة، وهذا يجعلها، تبعاً للمؤلفين، أقدم حياة أحفورية مكتشفة على الإطلاق. وما جعل هذا الاكتشاف أكثر أهمية هو هوية الأحافير نفسها، فكلها مجهرية، ومن الحجم والشكل لنوع خاص من البكتيريا التي تعيش على الأرض حاليا. فالحياة الأقدم على الأرض عاشت في البحر، ويبدو أنها كانت بحاجة إلى الكبريت لتعيش، وسرعان ما تموت لو تعرضت حتى لقدر قليل من جزيئات الأكسجين. وبينما تبقى هذه الحياة ما يمكن أن ندعوه شكل الحياة المعتمد على الكربون، فهي تأتي بعنصر الكبريت إلى مقدمة تقييمنا لكيفية نشوء الحياة ومحورها.[10]

يبدو أنّ الأحافير الموصوفة في ورقة بريزيير مرتبطة ببكتيريا دقيقة لا تزال تعيش على كوكبنا -بكتيريا تحتاج إلى عنصر الكبريت لتعيش، وتموت سريعاً إذا تعرضت لأخف نفحة من الأكسجين. فإذا ما صمد هذا الاكتشاف؛ فسيؤكد أن الحياة على كوكبنا بدأت في مكان غريب كلياً عن معظم الأرض حاليا، واعتمدت على الكبريت وليس على الأكسجين.

وارتبطت الحياة الأرضية عادة بغابات أرض أيامنا هذه وبحارها وبحيراتها وسماواتها - مع مخلوقات تعيش في الهواء الصافي والماء الأزرق النظيف وعلى التلال المغطاة بالعشب. وعلى الرغم من ذلك، فالأحافير شديدة الصغر التي وجدها بريزيير أتت من بيئة بدرجات حرارة أعلى بكثير من درجات حرارة اليوم، مع هواء مكون من غازات سامة، الميثان وثاني أكسيد الكربون والأمونيا وليس القليل من الغاز السام

كبريتيد الهيدروجين.[11] وقد عاشت على كوكب من المؤكد أنه دون قارات، أو فعلياً دون أي يابسة متصلة بوجه عام، ما عدا أشرطة سريعة الزوال من جزر بركانية. ففي هذا الوضع بدأت الحياة (أو وصلت) ومن ثم ازدهرت بلايين السنين. ورأي الأغلبية هو أننا جميعاً متحدرون من هذا الحادث من مهد الأرض، وحاملو تندبات منشأ الحياة الغنية بالكبريت وجيناتها.

وبعد فترة وجيزة من ظهور ذلك الوصف للنشأة الأقدم للحياة على الأرض في بيئة ناقصة الأكسجين وغنية بالكبريت، هبطت كيوريوسيتي روفر[12] Curiosity rover التابعة لوكالة ناسا على سطح المريخ. وسُئل مارتين بريزيير Martin Brasier، بعد وقت قصير من اكتشافه الخاص حول الحياة الأبكر على الأرض، عن إمكانية أن تكون الميكروبات الكبريتية للأحافير التي وجدها للتو قد عاشت على المريخ، أو أنها لا تزال تعيش هناك، وكان جوابه، بعد تأمل لفترة قصيرة، نعم.

وإذا تبيّن أن الحياة التي عمرها 3.4 بليون سنة هي الأقدم على الأرض، فإن ذلك سيضع العديد من الأسس المفضلة حالياً حول المكان المحتمل لأول الحياة على الأرض موضع تساؤل، فكوكبنا في ذلك الوقت كان بحد ذاته فعلياً قديماً - فأرضنا تجمعت، كما رأينا، قبل 4.567 بليون سنة. فإذا كانت هذه بالفعل هي الحياة الأولى، فهذا يوحي لبعضهم أن الحياة يجب أن تكون نسبياً سهلة التشكل في المقام الأول.

لكن كيف تتبدى سهولتها؟ وبأي ترتيب؟ دعونا نلقِ نظرة على ما كان مطلوباً لنشوء الحياة على الأرض. ولكي تبلغ الحياة وجودها فلا بد من أربع مراحل:

1. تخليق جزيئات عضوية صغيرة، كالأحماض الأمينية والجزيئات المدعوة بالنيوكليوتيدات، وتجمعها. وتراكم المركبات الكيميائية المدعوة بالفوسفات (واحد من المكونات الشائعة للأسمدة النباتية) سيكون متطلباً مهماً، فهي تشكل هيكل الحمض النووي DNA والحمض النووي RNA.
2. ربط هذه الجزيئات الصغيرة بجزيئات أكبر مثل البروتينات والأحماض النووية.
3. تجمع البروتينات والأحماض النووية في قطيرات تأخذ سمات كيميائية مميزة مختلفة عن بيئتها المحيطة: تشكل الخلايا.
4. القدرة على نسخ الجزيئات المعقدة الأكبر وتأسيس الوراثة.

بينما يمكن تكرار بعض الخطوات التي تقود إلى تصنيع الحمض النووي RNA - وحتى الإنجاز الأكثر صعوبة، إنتاج الحمض النووي DNA - في المختبر، فإن بعضها الآخر غير ممكن. وليست هناك مشكلة في تخليق أحماض أمينية -وحدات البناء الأساسية للحياة - في أنابيب الاختبار كما يتضح من تجربة ميلر - يوري في خمسينات القرن العشرين، ولكنّ هذه التجربة أوضحت أن صنع الأحماض الأمينية في المختبر تافه مقارنة بالمسألة الأصعب بكثير، تخليق الحمض النووي DNA صناعياً. والمشكلة هي أن جزيئات معقدة مثل الحمض النووي DNA (أو الحمض النووي RNA) لا يمكن ببساطة تجميعها في وعاء زجاجي عن طريق ربط مركبات كيميائية مختلفة. ومثل هذه الجزيئات العضوية تميل أيضاً إلى التكسر عند تسخينها، وهو ما يوحي أن تشكلها الأول يجب أن يكون قد جرى في بيئة باردة إلى معتدلة وليس في درجات حرارة عالية. والحياة على الأرض فيها الحمض النووي RNA وDNA، ومتى تمّ تخليق الحمض النووي RNA ينبسط الطريق إلى الحياة - لأن الحمض النووي RNA يستطيع في نهاية المطاف إنتاج الحمض النووي DNA. ولكنّ كيفية وجود أول RNA - تحت أي شرط وفي أي بيئة - صارت المشكلة المركزية التي تواجه أولئك الذين يحاولون العمل على مكان نشأة الحياة وكيفيتها. ولا يوجد أي نقص في المواقع المفترضة لبدء الحياة.

مراحل نشوء الحياة

آخر سلف عالمي مشترك	أول حياة DNA / بروتين	عالم RNA	عالم ما قبل RNA	كيمياء قبل الحياة	الغلاف المائي المستقر	تشكل الأرض
الوقت الحالي -3.6	~3.6	~3.8	~4.0	4.2-4.0	4.2	4.5

بركة داروين

كان تشارلز داروين Charles Darwin صاحب أول نموذج لظهور الحياة الأول على الأرض وأكثرها شهرة وقبولاً لفترة طويلة، فقد أوحى في رسالة إلى صديق له أن الحياة بدأت فيما يشبه "بركة ضحلة مدفأة بالشمس". وحتى يومنا هذا، لا يزال هذا النوع من البيئة، سواء أكان مياهاً عذبة أم ربما في منطقة المد والجزر إلى جانب البحر، مرشحاً قوياً في بعض الدوائر والكتب المدرسية. وقد اتفق علماء آخرون في وقت مبكر من القرن العشرين، مثل جي. هولدين J. Haldane وأيه. أوبارين A. Oparin، مع داروين وتوسعوا في هذه الفكرة.[14] فقد افترضوا، بشكل مستقل، أنّ الأرض الباكرة امتلكت غلافاً جوياً «مرجعاً» (الغلاف الذي يُنتج تفاعلات كيميائية معاكسة للأكسدة، وفي مثل هذه البيئة لن يصدأ الحديد أبداً).

وربما يكون الغلاف الجوي في ذاك الوقت قد امتلأ بالميثان والأمونيا، مشكلاً «الحساء البدائي» Prmovdial Soup المثالي الذي انبثقت منه الحياة الأولى في بعض الكينونات ضحلة المياه.

وبذلك، وحتى خمسينات القرن العشرين ومروراً بستيناته، ساد الاعتقاد أن الغلاف الجوي الباكر للأرض، الذي يُعتقد أنه مُكوّن من الميثان والأمونيا، قد سمح بالتخليق غير العضوي المألوف لوحدات (لبنات) البناء العضوية التي نسميها الأحماض الأمينية عن طريق الإضافة البسيطة للماء والطاقة.[15] وكل ما كان مطلوباً هو المكان الملائم لتجميع المركبات الكيميائية المختلفة. وعلى ما يبدو، فأفضل مكان لفعل ذلك كان بركة ضحلة نتنة أو منطقة المد والجزر المغسولة بالأمواج على حافة بحر دافئ ضحل. وتغدو الفكرة، في مثل هذا المكان، نوعاً ما من الحساء البدائي الممتلئ بجزيئات عضوية جلست فقط بانتظار الدكتور فرانكشتاين Frankenstein.

ويشكّك العديد من العلماء الباحثين حالياً في بيئات الأرض الباكرة في هذا السيناريو. فالمكونات العضوية الضرورية لتشكل الحياة معقدة، ومن السهل أن تتفكك في السوائل المسخّنة. وإضافة إلى ذلك، ستكون كمية الطاقة المطلوبة لإبقاء هذا الحساء خارج التوازن، الذي هو أمر ضروري، كمية هائلة. وما لم يستطع داروين تقديره في زمنه هو أنّ الآليات التي تقود إلى تطور الأرض (وغيرها من الكواكب الأرضية) أنتجت عالماً باكراً في تاريخه كان قاسياً وسامّاً، مكاناً بعيداً كل البعد عن منطقة المد المثالية أو البركة المتوخاة في القرن التاسع عشر وأوائل القرن العشرين.

وبعد ذلك قدّمت غوصات "ألفين" إلى الصدوع البركانية العميقة في المحيط، والموصوفة سابقاً في هذا الفصل، احتمالاً جديداً في أوائل ثمانينات القرن العشرين، دافع عنه جون باروس John Baross الذي يعمل الآن في جامعة واشنطن: إنّ الحياة على الأرض بدأت في النفاثات الحرارية المائية (الحرارية المائية) المكتشفة حديثاً بأعماق البحر.[16] وقد أضافت تقنيات جزيئية حديثة استُخدمت في تصنيف ميكروبات النفاثات الحرارية المائية معلومات مؤكدة إلى هذه الفكرة. فالحمض النووي DNA يخبرنا بأن الحياة إما أمضت دهورها الأولى في الماء الحار، وفي الواقع في الماء شديد الحرارة، أو أنها بعد التشكل في مكان بارد، وبطريقة أو بأخرى، تعرضت للبسترة حتى الموت تقريباً، وبعملية ما قديمة ونشيطة جدا.

وُجد مؤخراً أن معظم الميكروبات في النفاثات الحرارية المائية تنتمي إلى نطاق العتائق Domain Archaea. والعتائق Archaeans تنتمي إلى سلالة الكائنات الحية الأكثر قدماً المعروفة على الأرض، والأقدم هي الأليفة للحرارة أو المُحِبة للحرارة، لدرجة أنها تزدهر في الماء القريب من الغليان، الأمر غير الموجود في البرك. وقد أوحى هذا الاكتشاف أن الميكروبات من النفاثات الحرارية المائية كانت من العصور القديمة العظيمة.[17]

وخلال فترة الصدم العنيف بين 4.4 إلى 3.8 بليون سنة مضت، الزمن الخاص بالقصف العنيف الموصوف في الفصل السابق، سيكون كل حدث اصطدام متعاقب (ناجم عن مذنبات كبيرة يصل قطرها إلى 500 كم) قد بخّر المحيطات جزئياً، أو حتى كلياً، وتبخّرت أيضاً مناطق كبيرة من السطح الصخري للأرض؛ مما خلق سحابة هائلة الحرارة من الغاز الصخري أو الأبخرة تصل حرارتها إلى عدة آلاف درجة. وهذا البخار في الغلاف الجوي هو ما سبّب تبخر المحيط بأسره إلى بخار؛ مما قاد إلى تعقيم السطح وقتل جميع أشكال الحياة الوليدة. وسيُتبع ذلك التبرد بالإشعاع من الفضاء، لكن المحيط الجديد لن يقود إلى هطول المطر لآلاف السنين على الأقل بعد الحدث، ومن الصعب أن نتصور أن الحياة سوف تنجو في أي مكان على سطح الكوكب.

ولم يدخل تأثير الجسم الكبير في الأرض سابقاً مطلقاً في الأفكار المتعلقة بنشأة الحياة، لكننا نعرف الآن أنه خلال الفترة التي يجب أن تكون الحياة فيها وجدت لأول مرة على الأرض، ربما كانت الأماكن الوحيدة المعزولة عن الطاقات الجبارة لتأثيرات القصف العنيف هي إما في أعماق المحيطات و/أو في القشرة الأرضية نفسها. وربما كانت أعماق البحر أو الصخور هي فقط ما أمّن الملاجئ اللازمة لنجاة الحياة الأبكر.

لقد كانت مساحة اليابسة حتى نحو أربعة بلايين سنة مضت مساحة صغيرة، وكان النشاط البركاني واندلاع الحمم من داخل الأرض أكثر شيوعاً ونشاطاً بكثير مما هي عليه الحال حاليا. وبذلك كانت تلال أعماق البحار وأنظمة النفاثات الحرارية المائية التي تستكشفها الغواصات الصغيرة القليلة منذ منتصف سبعينات القرن العشرين أكثر طولاً ونشاطاً في ذلك الوقت الماضي السحيق مما هي عليه حاليا. وهذا كله يُترجم إلى عالم بركاني غني جداً بالطاقة ينفث كميات كبيرة من المركبات الكيميائية والمكونات العميقة للأرض باتجاه بيئة المحيطات. وربما كانت كيمياء مياه البحر مختلفة كثيراً

عما هي عليه الآن، والمحيط كان ما يمكن أن ندعوه كياناً اختزالياً (عكس المحيطات المؤكسِدة الحالية)؛ لأنه لم يكن يوجد أكسجين حر ينحل في ماء البحر. وربما كانت حرارة المحيطات حارقة.

وربما كان محتوى الغلاف الجوي من ثاني أكسيد الكربون أكبر بمئات إلى آلاف المرات مما هو عليه حاله اليوم. وكان هناك أيضاً سبيل ثابت لمستويات قاتلة من الأشعة فوق البنفسجية على السطح. وأنت بحاجة إلى يابسة لتحصل على بركة، وعندما تشكلت الحياة الأولى على الأرض، ربما لا يكون هناك أي يابسة على الأرض إطلاقاً، وربما لم يكن هناك سوى محيط سامّ ساخن من القطب إلى القطب.

الأسطح المعدنية في النفاثات الحرارية المائية

لا تزال النفاثات الحرارية المائية وأحياؤها من الميكروبات أليفة الظروف القاسية، بما في ذلك العتائق الوفيرة والمحبة للحرارة، المكان المفضل لنشأة الحياة، وهي، بعكس المحيطات والغلاف الجوي للأرض الباكرة، البيئة المُختزلة فعلياً بشكل كبير. وتنفث النفاثاتُ الحرارية المائية المركباتِ الكيميائية المناسبة لتطور الحياة، مثل كبريتيد الهيدروجين والميثان والأمونيا، وسط كثير من الماء الساخن. وكيمياء النفاثات الحرارية المائية ستكون إلى حدّ كبير منفصلة عن الغلاف الجوي، وبذلك فتطور الحياة قد يحدث بشكل مستقل عن الغلاف الجوي. وقد أزال ذلك مشكلة أن الغلاف الجوي للأرض لم يكن آنذاك مناسباً كيميائياً لتشكل الحياة. ولكن ما يدعى نشأة النفاثات الحرارية المائية يعاني مشكلاته الخاصة، فكيف أمكن للـ RNA، وهو الجزيء ضعيف الاستقرار كثيراً، أن يتشكل في النفاثات الحرارية المائية مع حرارتها وضغوطها العالية؟[18]

ربما تكون الحياة الباكرة قد تشكلت على سطح من أملاح كبريتيد الحديد المعدنية، على الأقل تبعاً لمُنظّر الحياة الباكرة المبجّل غونتر فيخترسهويزر Günter Wächtershäuser، الذي أطلق على هذه الفكرة اسم نظرية عالم الحديد والكبريت Iron-sulfur world theory.[19] والفرضية هي أن الحياة الأبكر، التي أسماها غونتر فيخترسهويزر "الكائن الرائد" Pioneer organism جُمِعت ضمن الضغط العالي والحرارة العالية على حدود نفاثة مائية حارة تحت الماء أنشأه النشاط البركاني تحت سطح البحر جاعلاً سوائل غنية بالمعادن الساخنة تتدفق إلى الأعلى مُحدثة فقاعات عبر النفاثات الحرارية المائية

المحددة بالصخور على مدى آلاف الأميال لهذه الشقوق البحرية العميقة. ربما تكون الحياة قد بدأت في درجات حرارة سوف تبخر الماء على السطح (100 درجة سيليزية)، إلاّ أنّ الماء لا يغلي تحت الضغط كما هو الأمر على السطح، والماء الخارج من النفاثات الحرارية المائية كان مجموعة كيمياء فعلية من عناصر ومركبات. ولكنْ، لكي يحدث أي نوع من بناء العضوية، فإن على السوائل القادمة من النفاثات الحرارية المائية أن تحتوي على كميات كافية من أول أكسيد الكربون وثاني أكسيد الكربون وكبريتيد الهيدروجين المذابة فيها لتوفير الكربون والكبريت اللازم لبناء الأحماض الأمينية، ومن ثم الأحماض النووية والبروتينات والدهنيات في نهاية المطاف.

وفي النهاية تشكلت تكدسات من المعادن تحوي الحديد والكبريت والنيكل عندما نُفثت السوائل الحارة الغنية بالمعادن خارجاً من النفاثات الحرارية المائية المسخّنة بفعل البراكين. وقد سمح هذا بتشكل مناطق صغيرة تستطيع احتجاز الجزيئات الحاملة للكربون ومن ثم تغيرها كيميائياً لتحرير ذرات الكربون الأولى، ومن ثم ربط ذرات الكربون المعزولة حديثاً هذه بعضها ببعض في جزيئات غنية بالكربون أكثر تعقيداً من أي وقت مضى. وعندما صار غاز كبريتيد الهيدروجين السام على تماس مع ذرات الحديد الموجودة في العديد من المركبات المعدنية في المنطقة نفسها، أنتج معدن البيريت Pyrite (الذهب الكاذب). وهذا التفاعل يُنتج جزيئات حاوية للطاقة، ومن ثم يجمع جانبين مهمين للحياة: العناصر الصحيحة لتوليد الحياة، ومصادر الطاقة لتوفيرها للكيمياء الضرورية. ولكن الطاقة الناتجة من التفاعلات مع البيريت صغيرة جداً وغير كافية بحد ذاتها لتغذية أي نوع من أشكال الحياة البدائية. فقد أدرك غونتر فيخترسهويزر أن الأمر سيتطلب التفاعل مع غازٍ آخر، أول أكسيد الكربون، ليقوم بوظيفة الوقود. وهذه الطاقة كانت المحرك المهم المطلوب الذي يقود كل ما يتبعها: التراكم البطيء للجزيئات الشبيهة بـالليغو Lego-like والتي تتجمع ببطء معاً لتشكل منتجاً نهائياً مختلفاً كلياً عن مجموع الأجزاء الكيميائية المختلفة.

ليست فكرةُ إمكانية أن تعمل الأسطح المعدنية كنماذج لتشكيل الحياة جديدةً. فأوجُه هذه المعادن المسطحة مثل الصلصال (الطمي) clay وبلورات المعادن السيليكاتية Silicate minerals أو البيريت ربما كانت مناطق مجهرية تجمعت فيها الجزيئات العضوية الباكرة. والحياة الأبكر، كما تصورها الجيولوجي أيه.جي. كيرنس سميث A. G. Cairns-Smith قبل بضعة عقود، يجب أن تكون اتصفت بعدة خصائص: يمكنها

التطور، وكانت منخفضة التكنولوجيا مع بضعة جينات (مواقع على جزيء الحمض النووي DNA ترمز إلى تشكيل بروتينات خاصة) وقليلة التخصص، وكانت مصنوعة من مركبات كيميائية أرضية تنشأ عن تفاعل تكثيف على السطوح الصلبة، من البيريت أو من أغشية كبريتيد الحديد. وعلى الرغم من ذلك، فمازال العديد من دارسي الحياة الباكرة متشككين من هذا السيناريو، وخصوصاً أن السيطرة العضوية تفتقر إلى عملية تتضمن الانتخاب، والتي من خلالها قد تتطور.

أول أكسيد الكربون Carbon monoxide وكبريتيد الهيدروجين قاتلان للحيوانات، وكان الأول قد حصد أعداداً لا تحصى من أرواح البشر في حالات تسمم، سواء أكان متعمداً أم لا. ومع ذلك، فإذا صحّت هذه الفكرة،؛ فسيكون الجمع بين الغازين القاتلين والذهب الكاذب هو الطريق إلى الحياة. فهذه النظرة قدمها نيك لان Nick Lane: "السلف المشترك الأخير للحياة...... لم يكن خلية حية حرة بل متاهة صخرية من خلايا معدنية محددة بجدران محفِّزة مكونة من الحديد والكبريت والنيكل، وطاقتها ناتجة من تراكيز بروتونية طبيعية. وهكذا، فأول حياة كانت صخوراً مساميةً ولّدت جزيئات وطاقة وصولاً إلى تشكيل البروتينات والحمض النووي DNA بحد ذاته".[20] وقد نشر ويليام مارتين William Martin ومايكل راسل Michael Russell وجهة نظر مغايرة عن هذه الفكرة في عام 2003 وحدّثاها في عام 2007.[21] فقد أخذا فكرة نشأة النفاثات الحرارية المائية خطوةً أبعد، بحجة أن مثل هذه البيئة يمكن أن توفر ليس فقط المواد الأولية كلها والطاقة اللازمة، بل أحد مفاتيح الحياة أيضاً: الخلية. وتقول رؤيتهما إن الحياة بدأت في معادن فائقة التنظيم تدعى أحادي كبريتيد الحديد Iron monosulfide. والمكان الذي تشكلت فيه الحياة سيكون بين الشيطان (حار جداً) والبحر الأزرق العميق (بارد جداً) - وفي هذه الحالة، وفي مكان ما يقع جغرافياً بين سائل (وساخن!) غني بالكبريت منبعث من نفاثات أو تسربات مائية حارة (أنتجتها البراكين) وبين ماء بحر قديم ربما كان ممتلئاً بالحديد. ولكن هذا كان أكثر من نظرية، فبالفعل توجد أطر ثلاثية الأبعاد قرب نفاثات والشقوق (التسربات) الأحفورية يمكن ملاحظتها حاليا - وهذه يمكن أن تكون السلف لجدران الخلايا. وقد يكون "التخليق البريبوتيك" للجزيئات العضوية قد جرى على الأسطح الداخلية للأجزاء المجهرية في المعادن المتشكلة قرب النفاثات والشقوق. ومن الممكن أن تكون كيمياء "عالم RNA" الناشئ قد حدثت داخل جدران الخلايا المعدنية تلك.

ومع مطلع القرن الجديد، وُجدت دلائل عديدة، وطُرح للنقاش العديد من الأماكن المحتملة لنشأة الحياة الأولى. فقد كانت الحياة الأقدم الباقية على قيد الحياة على الأرض بالتأكيد محبة للحرارة، ومن نوع لا يزال موجوداً في النفاثات الحرارية المائية. فقد وجد في النفاثات ما تحتاج إليه الحياة من المركبات الكيميائية والطاقة، حتى وإن كانت لم تتطور بالضرورة هناك. وفي النهاية، فقد وفرت النفاثات ملاذاً من الظروف القاسية لسطح الأرض في وقت باكر، والأكثر أهمية اعتبارها ملجأ قنابل من وابل الكويكبات القاتلة لبليون السنة الأرضية الأولى. ولكنْ كانت هناك عقبة واحدة كبيرة لقبول موحد لهذه النظرية: ثباتية RNA، وبدرجة أقل منه الحمض النووي DNA ، ضعيفة إلى حدّ كبير في درجات الحرارة العالية كتلك الموجودة في النفاثات الحرارية المائية. وبمجرد خلق RNA، فالقفزة من الحمض النووي RNA إلى DNA كانت ستصبح أكثر بساطة، إذ يعمل الحمض النووي RNA كقالب Template لتخليق الحمض النووي DNA. أما الحصول من جزيئات صغيرة على شيء أكثر تعقيداً مثل RNA، الذي يتكون في أبسط تكويناته من العديد من الذرات في مواضع دقيقة جداً؛ فلا يزال لغزاً. فعلى الرغم من كونه لغزاً فإنه ليس مستحيلاً بأي شكل، والتقدم السريع في التشكيل الصناعي فيما هي أساساً أنابيب اختبار، يُبيّن لنا السبيل الإجمالي، إذا لم يوضح التفاصيل كلها بعد.

لقد وضع عالم الأحياء كارل ووز Carl Woese أيضاً فرضية [22] لنشأة محتملة أخرى للحياة تقول إنّ الحياة بدأت حتى قبل اكتمال تشكل الأرض وتمايزها إلى اللب والوشاح والقشرة التي نراها حاليا. وهكذا، ففي تلك الأوقات الباكرة، ربما تكون كميات كبيرة من الحديد المعدني قد وجدت على سطح الأرض في تماس مع البخار وبعض الماء السائل وسط غلاف جوي مملوء بثاني أكسيد الكربون والهيدروجين. والأخير هو المثير جداً للاهتمام لأنه محرّك قويٌّ للتفاعلات الكيميائية. ولكنْ، وبسبب خفة وزنه، فمن اليسير أن يحدث فقدان الهيدروجين إلى الفضاء في كواكب صغيرة الكتلة كالأرض والمريخ والزهرة (فالكواكب العملاقة ذات كتلة هائلة تمكنها من القبض على هيدروجينها). وفي ذاك الوقت، كانت الأرض تتعرض لوابل من الحطام الفضائي الكبير والصغير؛ مما تسبب بإحاطة الكوكب بسديم من جزيئات الغبار وبخار الماء. وستتشكل سحب عالية من بخار الماء، وهذه القطيرات الدقيقة ستكون قد خدمت كخلايا بدائية Protocells - كائنات صغيرة شبيهة بالخلايا. ومع عمل ضوء الشمس كمصدر للطاقة، وحمل الغبار المنبعث من السطح للجزيئات العضوية من بين العديد من الجزيئات والعناصر الأخرى

التي وُجهت إلى السماء عن طريق القصف الكويكبي، سيكون محتملاً توفر كميات كبيرة من المواد الأولية التي يمكن تصنيع الحياة منها. ومع وجود كثير من الهيدروجين أيضاً، فالكائنات الحية البدائية الأولى في سبيل التطور تكون قد أنتجت الميثان بعد استخدام ثاني أكسيد الكربون كمصدر للكربون. والميكروبات التي تستخدم هذا السبيل حاليا - الهيدروجين للطاقة وثاني أكسيد الكربون للكربون - تدعى مولدات الميثان Methanogens. ومع تبريد الأرض، تشكلت المحيطات، وستكون الحياة قد سقطت من السماء لتسكن المحيطات.

حفر الاصطدام في الصحاري

يأتي أحد أحدث الاقتراحات من ستيف بينر Steve Benner، من جامعة فلوريدا[23] ومن المؤلف المشارك لهذا الكتاب، جو كيرشفينك Joe Kirschvink. وكما ذكرنا سابقا، فالخطوة الأصعب في كل هذا هي صناعة الحمض النووي RNA. وهذا لأن الحمض النووي RNA جزيء هش جداً وكبير ومعقد وبذلك فتخريبه يسيرٌ جداً. فالماء يهاجم بوليمرات الحمض النووي Nucleic acid polymers (سلسلة من جزيئات أصغر) التي يتشكل منها الحمض النووي RNA. وفي الواقع، يبدو أنه يوجد العديد من الخطوات المطلوبة لتخليق RNA، وربما تتطلب كل خطوة شروطاً مختلفة أو بيئة كيميائية مختلفة. وقد وصف الكيميائي الحيوي أنتونيو لازكانو Antonio Lazcano هذه المشكلة كما يلي: "يواجه نموذج عالم الحمض النووي RNA العديد من التحديات الجدية، بما في ذلك عدم وجود آليات غير حية بدائية معقولة يمكن أن يُنسب إليها تكوين الريبوز Ribose وتراكمه".[24] وأحد الشروحات الممكنة هو فرضية احتمال أن يتشكل الريبوز في ضوء درجات الحرارة الحالية من معادن الصحراء الشائعة.

لقد لاحظ بينر أنّ المشكلة الكبرى لم تكن في تصنيع الكربوهيدرات (بما في ذلك الريبوز)، بل في منع التفاعلات التي تشكله من الاستمرار بجنون؛ مما أنتج قطران فحم بنياً لزجاً يلصق كل شيء بعضه ببعضه الآخر. ومن خلال النظر بعناية إلى نمط التخليق، وبعد التأمل في جدول أنصاف الأقطار الأيونية، أدرك أنّ الطريق إلى قطران الفحم يمكن أن يكون قد تمّ إيقافه بشكل خاص من خلال التفاعل مع كاتيونات الكالسيوم (Ca^{+2}) والبورات Borate (أو BO_3^{-3}). ومعادن بورات الكالسيوم هذه

(مثل الكوليمانيت Colemanite واليوليكزيت Ulexite) غالباً ما تُستخدم في الصابون وتتشكل عن طريق تبخر المحاليل الملحية في بيئات حارة جافة. والخطوة الوحيدة الإضافية المطلوبة لإنتاج الريبوز النشط بيولوجياً هي فقط إعادة ترتيب دقيقة محفزة بالموليبدينوم Molybdenum المؤكسَد.

لقد بحث بينر أيضاً عن مفاتيح في الحياة الموجودة، فقام بتحليل ثباتية مختلف البكتيريا ووجد أن السلالة الأكثر قدماً ربما تكون قد تشكلت في حرارة قدرها 65 درجة سيليزية، وهذه الدرجة أعلى من درجة حرارة أي "بركة دافئة صغيرة"، لكنها أبرد بكثير من النفاثات الحرارية المائية التي تصل حرارتها تقليديا إلى عدة مئات من الدرجات. وفي الواقع، يوجد عدد قليل جداً من الأماكن على سطح الأرض الآن وحتى من 3.7 بليون سنة، قد تكون بمثل تلك الحرارة، عدا الصحاري.

والظروف الشبيهة بالبيئة الصحراوية، حيث البيئة العامة قلوية وتكون بورات الكالسيوم وافرة، هي البيئة الوحيدة التي قد يكون تشكيل الريبوز فيها من معادن البورات مرغوب فيها. وكذلك، فإن معادن الصلصال من مختلف الأنواع شائعة أيضاً في مثل هذه الأوضاع، ويبدو، على نحو متزايد، كما لو أن قوالب تشكلت في الصلصال وساعدت على إحداث تصنيع المكونات العضوية المعقدة الضرورية للحياة.

ولتشكيل معادن البورات المطلوبة لاستقرار الحمض النووي RNA، لابد من وجود نظام سائل يتواصل فيه تكرار سكب السوائل وتقطيرها في سلسلة من الخطوات المترابطة. فقد افترض كريشفنك، بالتعاون مع الدكتور بين وايس Ben Weiss من معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا MIT، وضعاً طبيعياً قد يقود إلى تشكيل الحمض النووي RNA من البورات في نموذج تقريبي اقترحه ستيف بينر. والمثال الجيد في كاليفورنيا، حيث يمرّ البورون Boron المتسرب من الصخور البركانية في سلسلة جبال سيرا نيفادا عبر سلسلة من البحيرات المؤقتة تشمل بحيرة مونو وبحيرة أونيس وبحيرة الصين وبحيرة سيرليس وبحيرة بانامينت، ويصل أخيراً إلى قاع وادي الموت. وتتشكل رواسب البورات الكبيرة في عدد قليل من آخر هذه الخزانات. والمرشح الأكثر وضوحاً لهذا النظام، على الأقل في الأرض البدائية، وخصوصاً بين 4.2 و3.8 بليون سنة مضت، الزمن الذي قد تكون الحياة تشكلت فيه للمرة الأولى، سيكون سلسلة من فوهات الصدم ارتبطت في أوضاع صحراوية

بنظم مائية مُتصلة عبر الفوهات من الارتفاعات الأعلى إلى الأدنى. وبهذه الطريقة قد تتحقق السلسلة ذاتها من التقطير والسكب. ولكن من غير المرجح أن يكون مثل هذا الموقع موجوداً منذ أربعة بلايين سنة عندما كانت تحدث هذه الكيمياء الباكرة كلها. وكانت ظروف الأرض أيضاً وقتها مُختزِلة بشدة؛ مما يحول دون ظهور الموليبدنوم المؤكسِد لإعادة الترتيب النهائية لتركيب الريبوز.

ويبدو أنه قد تمّ إنتاج صخور الأرض الأقدم كلها في وضع مائي، وفي الواقع، لا يوجد دليل جيد على قارات واسعة من اليابسة على الأرض حتى أقل من ثلاثة بلايين سنة مضت - على كوكب بعمر 4.6 بليون سنة - والحطام الزيركوني الأقدم يوحي أنّ المحيطات تعود إلى 4.4 بليون سنة. أما دليلنا الأفضل فهو أنّ الأرض، في ذاك الوقت حيث تشكلت الحياة للمرة الأولى، كانت فيها محيطات عالمية تقريباً، مع أشرطة من الجزر على أبعد تقدير. ولكن الأرض لم تكن الكوكب الصخري الداخلي الوحيد، فكوكب الزهرة يماثل تقريبا حجم أرضنا ذاته تقريباً، لكنه قريب جداً من الشمس؛ مما يستبعد تماماً ترجيح أن تكون الحياة قد تشكلت مطلقاً هناك. ومع ذلك، فنحن نعلم أنه يوجد احتمال آخر يحبّذه الخيال العلمي: المريخ.

لقد حصل تقدم كبير خلال قرننا الحالي في فهم التاريخ الجيولوجي القديم للمريخ، فهو لم يكن قطُّ كوكباً تغطيه المحيطات، ونحن متأكدون تماماً لأن الصخور الأقدم لا تزال هناك، مكشوفة على السطح. ولكنّ الكم الهائل من البيانات الجديدة من المركبات الجوالة المريخية المختلفة أخبرنا بأن ما يُدعى بالكوكب الأحمر احتوى على بحيرات كبيرة، وبحار صغيرة ربما، ومن المحتمل أنه كان هناك محيط قديم في حوض القطب الشمالي. ويوجد دليل أيضاً على أن المريخ فيه تفاعل أكسدة واختزال أكبر مما لدى الأرض، وهذه التدرج الحراري هو وسيلة مهمة تستخدمها الحياة للحصول على الطاقة. والوشاح العميق للمريخ مُختَزِل بشدة بحيث يزداد احتمال وجود الميثان والهيدروجين وباقي الغازات اللازمة للتصنيع قبل الحيوي للمركبات الكيميائية الغنية بالكربون واللازمة للحياة، ومن ثمّ فهو يوفر المواد الأولية الضرورية. وهناك البعض ممن يدعمون فكرة راديكالية (والمؤلف المشارك كيرشفينك من أشدّ المؤمنين بها) تقول إن الحياة لم تتشكل فقط على سطح المريخ منذ أكثر من أربعة بلايين سنة، بل إنها جاءت إلى الأرض على متن النيازك، نحن هذه الحياة. والسؤال هو فيما إذا كانت حياة المريخ الباكرة قادرة على الوصول إلى الأرض أصلاً.

البذور الكونية وقضية المريخ

يُقسَم سطح الأرض اليوم تقريباً إلى أحواض محيطات كبيرة تغطي نحو 75 في المئة من السطح، وكتل قارية تستقر فوق مستوى متوسط سطح البحر. ونحن نعلم من تقنيات تأريخ العمر البسيطة للقارات والعديد من الوسائط الجيوكيميائية الأخرى أن القارات ظلت تنمو ببطء مع مرور الوقت. وتُضاف صخور جرانيتية قاعدية جديدة على طول حواف القارات في مناطق الاندساس Subduction، حيث الصخور الرطبة والمحملة بالرسوبيات تُحمل إلى الأسفل عدة كيلومترات وتنصهر جزيءيا لتشكل الجرانيت. وهكذا، ونحن نعود إلى الوراء بشكل أعمق في الزمن الجيولوجي، توجد توقعات قوية بأنّ مساحة الأرض مقابل مساحة المحيط كانت أقل.

إلاّ أنه توجد حتى محددات أكثر، فنحن نعلم من النماذج الجيوفيزيائية أنه مباشرة بعد التأثير الهائل لحدث تشكل القمر قبل 4.5 بليون سنة، كانت الأرض قد صُهرت كلها. ووجد محيط الصهارة العملاق، وهو نتيجة الحرارة الشديدة الناجمة عن الالتحام، فضلاً عن عزل معادن النيكل والحديد في الأسفل في لبّ الأرض. وكان النصف الأول للبليون سنة أو أكثر بعد هذا الحدث هو زمن تدفق الحرارة العالية إلى جانب التصلب التدريجي للقشرة الأرضية في الطبقات العليا من الغلاف الصخري للأرض. وقد وضعت زيادة تدفق الحرارة تلك حداً للارتفاع الذي يمكن لأي كتلة يابسة أن تبلغه فوق مستوى البحر الأساسي. فالقارة التي تستقر عالياً فوق قاع البحر هي كذلك ببساطة؛ لأنها محددة من الأسفل بمادة أقل كثافة تؤدي إلى تعويمها. وإذا كان جريان الحرارة عالياً، فالجذر أسفل القارة سينصهر. وهذا ما منع السلاسل الجبلية العالية من التشكل.

وأخيراً، يشتبه علماء الجيوكيمياء بأن حجم محيطات الأرض ربما انخفض تدريجياً مع الوقت. فبعد حدث تشكل الأرض العملاق، من المرجح أن كثيراً من بخار الماء ظهر في نظام مكثف على شكل بخار على سطح الأرض الفتية، وقد أعيد تدريجياً إلى الوشاح عبر عملية تكتونية الصفائح Plate tectonics. وتشاهد إعادة الصياغة هذه في البصمة الكيميائية للزيركونات ذات العمر 4.4 بليون سنة المذكورة سابقاً. وتختلف التقديرات حول حجم هذا المحيط الأول من حد أدنى يساوي نحو ما لدينا اليوم إلى ثلاث أو أربع مرات أكثر من الموجود في الوقت الحاضر. ومع هذه المحددات كلها، لن يكون عادياً ترجيح أن أيّ شيء آخر، غير رأس أعلى قمة لبركان ما، وجد نفسه عالقاً فوق مستوى سطح البحر قبل 3.5 بليون سنة.

وعالَم المياه ليس مكاناً جيداً جداً لتشكُّل الريبوز، وهو أيضاً مكانٌ غير مقبول لتشكيل الجزيئات الكبيرة كالبروتينات والأحماض النووية، والذي يُطلق كمية قليلة من الماء في كل مرة تُضاف فيها وحدة بناء جديدة. ولهذه الأسباب، ربما لم تكن أي بقعة في الأرض مكاناً جيداً جداً لنشأة الحياة حتى نحو 3.5 بليون سنة. وليس من المرجح حتى في حينها، وحتى وقت لاحق كبير، أن تكون الأرض قد احتوت على سلسلة من البحيرات المشابهة لتلك الموجودة في وادي الموت لتكون قادرة على تخصيب معادن بورات الكالسيوم إلى المستويات المطلوبة لاستقرار الريبوز وغيره من الكربوهيدرات التي تحتاج إليها حكماً الحياة الباكرة. ومن المؤكد أنها لم تكن تمتلك سمات كيميائية كبيرة تنتج ما يكفي من الطاقة لتكون قد غذّت الاستقلاب الباكر الهش.

لقد أُجريت تجارب واسعة خلال العقد الماضي وأظهرت بوضوح أنّ النيازك يمكن أن تنتقل من سطح المريخ إلى سطح الأرض دون أن تكون قد عُقِّمت بالحرارة – وبذلك تمكنت من نقل الحياة من المريخ إلى الأرض.[25] وقد انتقل أكثر من بليون طن من حجارة المريخ إلى الأرض على مدى 4.5 بليون سنة الماضية. ولذلك، فمن المهم خلال النظر إلى نشأة الحياة وضع احتمال أنها ظهرت أولا على المريخ ثم انتقلت إلى هنا بواسطة النيازك.

ويبلغ قطر المريخ نحو نصف قطر الأرض فقط، ويشكل نحو عشرة في المئة من كتلتنا. ولأنه كوكب أصغر فحقل جاذبيته أصغر، ولذلك فمن اليسير على شيء مثل النيزك أو جزيء غازي أن يفلت تماماً. ولهذا السبب فعندما يصطدم كويكب صغير بسطح المريخ (بسرعة 15-20 كم/الثانية)، يستطيع إخراج كمية كبيرة من مادة السطح إلى المدار حول الشمس، والصخور المريخية الملقاة خارج كوكبها لن تخضع لتسخين كاف أو لصدمة كافية لتعقيمها. أما على الأرض؛ فالجاذبية الأقوى تعني أن كمية أكبر من الطاقة مطلوبة لإطلاق مادة إلى الفضاء السحيق. ولا يوجد تسجيل لمواد غير عقيمة أبداً تم إطلاقها من الأرض بعمليات طبيعية.

وبذلك، فالحياة ستستطيع الإفلات بسهولة لو تطورت على المريخ أصلاً. ومن ناحية أخرى، فمجال الجاذبية الأقوى للأرض يعني أنها أفضل بكثير من المريخ لجهة الحفاظ على غلافها المائي والجوي سالمين خلال الزمن الجيولوجي. والضغط الجوي على المريخ منخفض جداً لدرجة أن الماء السائل سيغلي ببساطة عند درجة حرارة الغرفة. والبيانات من المركبة الفضائية المريخية الأحدث، كيوريوسيتي التي هبطت عام 2012، توضح أنه كانت هناك تيارات متدفقة تنهمر نحو بحيرة كبيرة أو ربما محيطٍ في فوهة

غالي Gale حيث حطت كيوريوسيتي. عالمٌ مع صخور بركانية، يزخر بتيارات متدفقة ومحيطات مع دورة هيدرولوجية نشيطة لابد أن يكون قد احتوى على حياة ما. أو أنه بالتأكيد احتوى عليها. ونحن نناقش أنه من المحتمل أن يكون المريخ هو المكان الذي تطورت فيه فعلاً الحياة الأولى التي هي على الأرض حاليا.

إذا عدنا أكثر إلى السجل الهيدياني (الجهنمي) Hadean record على الأرض سيكون واضحاً أن المحيطات كانت موجودة منذ 4.4 بليون سنة. وفي وضع المريخ تشكلت الحياة الأولى، باستخدام طريق البورات المفترض من قبل بينر ثم المرور عبر فوهات مرتبطة بوضع صحراوي، وهذا هو الاحتمال الجديد الذي دافع عنه كيرشفينك مع وايس[26] باكراً في هذا القرن. ويؤكد عدد من التجارب حاليا أن جزيئات عضوية معقدة، وحتى مراحل هجوع الميكروبات، يمكن أن تكون قد نُقلت من المريخ إلى الأرض عبر عملية تُعرف بالتبذر الشامل بين الكواكب - إذ قاد اصطدام كبير على سطح المريخ، لنقُل قبل 3.6 بليون سنة، إلى قذف عدد كبير من النيازك المريخية إلى الأرض - وبذلك بذرت كوكبنا بالحياة المريخية.

ويوجد دليل آخر صغير يدعم النشأة المريخية للحياة ويستند إلى الأبحاث الحديثة التي أجراها ديفيد ديمر David Deamer من جامعة كاليفورنيا في سانتا كروز.[27] فإحدى أكبر المشكلات التي تواجه الوصول إلى شريط RNA طويل بما يكفي لفعل أي شيء هي ربط القطع المكونة للرنا لتشكيل بوليمر Polymer، وهو شريط طويل من الحمض النووي RNA يتكون من العديد من الوُحيدات التي تُدعى نيوكليوتيدات RNA. وأظهر ديمر أنّ تجميد محلول ممدد من نيوكليوتيدات مفردة يجبر العديد منها على التجمع جنباً إلى جنب على طول حافة بلورات الجليد. ولم يوجد الجليد على الأرض في ذاك الوقت، لكن المريخ كان ممتلئا بالجليد القطبي، وخصوصاً في تاريخه الباكر عندما كانت الشمس باهتة تماماً، كما هي الحال الآن.

تشكل الحياة - ملخص عام 2014

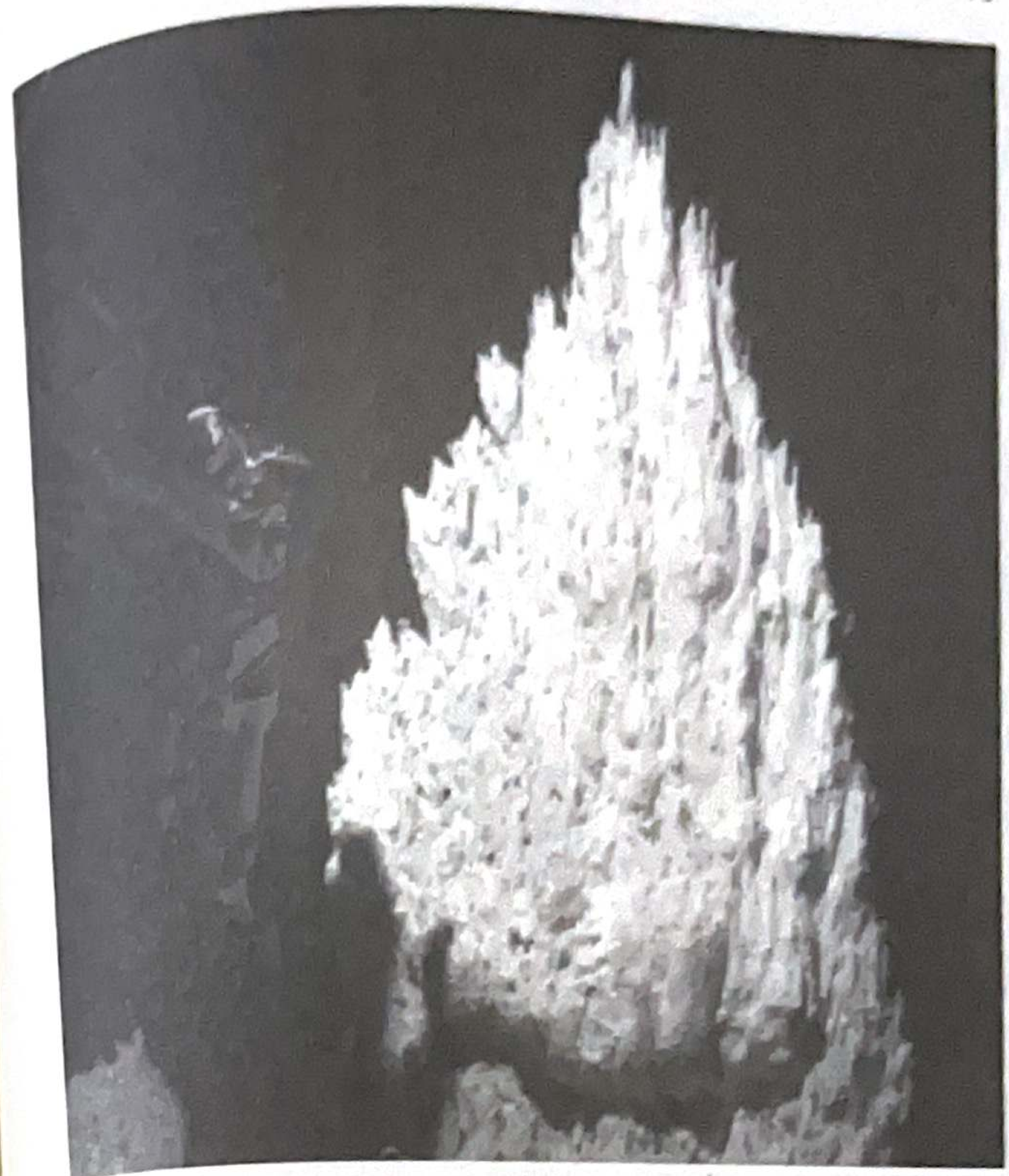
لقد اعتمد تعزيز فهمنا لكيفية تشكل الحياة للمرة الأولى من اللاحياة في الأرض البدائية إلى حدّ ما على مدى اقترابنا من إنتاج الحياة في أنبوب الاختبار. وحتى نحو خمس سنوات مضت، كان الجواب لسنا قريبين جداً على الإطلاق. ولكننا، بفضل فريق في هارفارد بقيادة الكيميائي الحيوي والحاصل على نوبل عام 2012 جاك شوستاك Jack Szostak، صار الجواب أقرب مما يتصوره معظم الناس.[28] فقد اختبر شوستاك وزملاؤه

كيمياء الحمض النووي RNA لما يقرب العقدين من الزمن. فقد كان جزيء المعلومات الأبكر إما الحمض النووي RNA أو شيئاً ما يشبهه إلى حد كبير، وتطور لاحقاً إلى الحمض النووي RNA كما نعرفه الآن. وقد قطعت مجموعة شوستاك أشواطاً كبيرة في دراسة الحمض النووي RNA في هذا القرن.

كانت البراعة في محاولة جعل نيوكليوتيدات في محلول يرتبط واحدها بالآخر في RNA بأطوال قصيرة. وجعل النيوكليوتيدات ترتبط بسلسلة أسهل من حملها على التكاثر متى تشكلت جزيئات RNA، ومع ذلك، فهي ستقوم بالتكاثر لو ارتبط نحو ثلاثين نوكليوتيداً. ويعود ذلك إلى أنّ جزيء الحمض النووي RNA بمثل هذا الطول أو أطول يكتسب خاصية جديدة تماماً: يصبح مركباً كيميائياً يسمّى الحفّاز Catalyst، وهو الجزيء الذي يساعد على تسريع التفاعلات الكيميائية. وفي هذه الحالة، فإن التفاعل الذي سيتم تسريعه ليس إلا إعادة إنتاج جزيء الحمض النووي RNA في نسختين متطابقتين.

ربما تطلب الحصول على شرائط RNA بطول ثلاثين نوكليوتيدا على الأقل، في مكان ما على الأرض البدائية أو فيها، استخدام الصلصال كقالب. ويبدو أنّ مونتموريلونيت *Montmorillonite* الغضار المعدني (معدن غضاري غني بالألمنيوم ويحوي بعض الصوديوم والمغنيزيوم) هو الأكثر ملاءمة. وتبعاً لهذه الفرضية، فالنيوكليوتيدات المفردة الطافية في السائل ارتطمت بالصلصال؛ فصارت مرتبطة ارتباطاً ضعيفاً بالطين (الغضار) وتثبتت في مكانها. وبذلك، فقد تشكلت على بعض أجزاء الغضار سلاسل من ثلاثين نوكليوتيداً أو أكثر. ولأن ارتباط هذه السلاسل بالغضار ضعيف، فقد انفصلت بسهولة؛ وإذا كان هناك تركيز ما من هذه السلاسل وصارت مُغلّفة ضمن فقاعة صغيرة من سائل غني بالدهن، شديد الشبه بفقاعة الصابون، فبهذا ستكون قد صُنعت الخلية البدئية الأولى.

والمكونان الرئيسان الضروريان للحياة هما: خلية تستطيع إعادة إنتاج نفسها ونوع من الجزيئات التي يمكنها حمل المعلومات، والقيام بالتحفيز الكيميائي (تغيير الشروط بحيث يسمح وجود المُحفّز بجريان تفاعل كيميائي لا يمكن أن يحدث بطريقة أخرى). وإذا أمكن إدخال مكونات جديدة كافية من الحمض النووي RNA إلى الخلية؛ فسيقوم الفعل المحفز للحمض النووي RNA بتصنيع المزيد من الحمض النووي RNA مادامت مركبات كيميائية جديدة مناسبة تدخل إلى الخلية نفسها. وبينما كانت الفكرة القديمة تقول إنّ الخلايا والجزيئات الصغيرة الحاملة للمعلومات تشكلت بسبل منفصلة في مكان ما ثم اندمجت لاحقاً، فإنه يبدو حاليا أنها تطورت في وقت واحد.



المدينة الضائعة المكتشفة حديثاً - نفاثات مائية حارة تلال منتصف المحيط في وسط وشمال المحيط الأطلسي. وقد اكتشفها من علماء بحار من جامعة واشنطن، وهي تتكون من صخور غنية بالجير ومن ثمّ هي أكثر بياضاً من النفاثات السود الأكثر شيوعاً في المحيط الأطلسي. وقد اعتُبرت هذه المواقع الأماكن الأولية الممكنة، حيث ولدت الحياة للمرة الأولى على الأرض (صورة بإذن من جامعة واشنطن)

لقد دافع العديد من علماء الحياة عن فكرة أن الحياة الأولى كانت تماماً كما يلي: جزيء "عارٍ" من الحمض النووي RNA يطوف في حساء من النيوكليوتيدات ويعيد إنتاج نفسه مراراً وتكراراً. لكن وجهة النظر الأكثر تفضيلاً هي أن الخلايا والحمض النووي RNA تطورا كوحدة واحدة، خلية مزدوجة الجدار من الدهن مع نيوكليوتيدات RNA صغير بداخلها، ونما من خلال الحصول على مزيد من الدهن والمزيد من النيوكليوتيدات التي ربما انتقلت عبر فجوات في دهن جدار الخلية، بينما تكون النيوكليوتيدات الأكبر المرتبطة داخل الخلية كبيرة جداً؛ مما يمنعها من الخروج عبر الجدران. فالمواد المتاحة على الأرض البدائية واللازمة لبناء الخلية البدئية كانت مركبات كيميائية قد تجمعت لتشكل جزيئات دهنية هي نفسها ستتصل بسهولة ببعضها لتشكل صفائح، ومن ثم جسيمات كروية.

وبسبب خواصها الكيميائية، فإن تراكمات جزيئات دهنية كافية ستشكل بسهولة كريات جوفاء عندما تتعرض للخض، تماماً كما يشكل الماء قطرات صغيرة على سطحها لفترة وجيزة. ومع تشكل هذه الكريات، ستُملأ بالجزيئات التي تستطيع تشكيل الحمض النووي RNA إذا وجدت هذه الجزيئات (النيوكليوتيدات) في السائل. ومجدداً، فهذا هو السبب في كون التركيز بالغ الأهمية، وفي الاستخدام المستمر لمرادف «الحساء قبل الحيوي» Prebiotic soup. ويجب أن يكون هناك عدد كبير من النيوكليوتيدات لتحصرها كرية خلية بدئية فجائية التشكل إذا كان هناك أي فرصة ليتشكل الحمض النووي RNA فيها. وما لم يكن ذلك، فيجب بالطبع أن تتمتع الخلية البدئية الجديدة بخاصية تسمح بتحريك النيوكليوتيدات الموجودة خارج الخلية إلى داخلها بآلية فاعلة أو منفعلة.

لا يقوم جدار الخلية بالتغذية بالنيوكليوتيدات فقط، بل يقوم أيضا بمراكمة المزيد من الجزيئات الدهنية، وبذلك يتطاول ليأخذ شكل النقانق. وفي نهاية المطاف سينشطر، وستظهر كرتان تحمل كل منهما نحو نصف الحمض النووي RNA - وأكثر بكثير من مجرد الحمض النووي RNA بطبيعة الحال. ولتقوم بوظائفها لأي فترة من الزمن، سيتعين على الخلية الحصول على الطاقة، وهذا يتطلب آلة كيميائية - مصنوعة من البروتين. ولذلك سيتعين على الخلية الاحتواء على كميات كبيرة من المركبات الكيميائية ضمنها لتعمل بأسلوب منظم نوعاً ما يمكّنها من إحضار المركبات الكيميائية اللازمة وطرد المركبات الكيميائية غير الضرورية خارجاً. ويجب أن تكون مملوءة بقطع الغيار، جزيئات من مختلف الأنواع تكون متاحة بسهولة.

هذه هي المرحلة حيث يبدأ التطور. ربما تتكاثر بعض الخلايا أسرع من غيرها استناداً إلى طبيعة الجزيئات داخل الخلية الجديدة. ويبدأ مفعول الانتخاب الطبيعي بذلك ويشغّل محرك الحياة كما نعرفه: خلايا مستقلة وتستقلب وتتكاثر وتتطور. والبقية، كما عبر فرانسيس كريك في مقولته الشهيرة العظيمة قديماً جداً، كانت تاريخاً.

العتبة الداروينية

ربما كانت خلايا حياة الأرض البدائية مثل وحدات المنازل المسبقة الصنع، ويُجهَّز كل جزء كمكون منفصل في مكان مختلف، ومن ثم تنقل الأجزاء كلها إلى مكان واحد. ونظام النقل قد يكون عبر الماء أو الهواء، والاحتمال الأخير يتلقى دعماً قوياً من عمل جديد بدأ في عام 2010 باحثاً عن كمية الحياة ومادة الحياة الموجودة في الطبقات العليا من الغلاف الجوي.

وربما كانت الحياة الأبكر قد تكونت من خلايا ذات جدر خلوية عالية المسامية؛ مما يسمح بمبادلة مجمل الجينوم، وهي عملية تُعرف بالنقل الأفقي للجينات Horizontal gene transfer. ولكنْ جاء الوقت الذي انتقلت فيه أنظمة الخلية من الطبيعة الزائلة إلى الدائمة. وهذه هي النقطة التي دعاها عالم الأحياء كارل ووز Carl Woese بـ"العتبة الداروينية". إنها النقطة التي يمكن التعرف عندها إلى الأنواع، في شيء ما يقترب من معناها الحديث، ويحدث عندها الاصطفاء الطبيعي – التطور بكلمة أخرى. والاصطفاء الطبيعي أعطى أفضلية للخلايا المتكاملة الأكثر تعقيداً وظيفياً على السلائف الأبسط، وقد ازدهرت على حساب تنوعات نمطية أبسط.

لقد وُلدت حياة الأرض الحديثة عندما توقف التغيير الجذري للجينات. ويؤمن بعض الذين يدرسون تطور الحياة الأولى، مثل كارل ووز Carl Woese، بأن الوصول إلى هذه الدرجة من التنظيم هو الحدث الأكثر أهمية في التاريخ التطوري كله. ومع ذلك، فتلك الخلايا الأولى لم تكن بالتأكيد وحيدة لأنه ربما كانت هناك نظم إيكولوجية Ecosystems حُزمت بجميع الأشكال الممكنة من تجميعات المركبات الكيميائية المعقدة التي امتلكت على الأقل بعض جوانب الحياة. ويمكننا التفكير في الأمر كحديقة حيوان عملاقة للكائنات الحية، وشبه الحية، وتلك التي تتطور لتصبح حية. فما الذي يمكن لحديقة الحيوان تلك أن تحويه؟ كثير من مخلوقات الحمض النووي من أنواع عديدة، وأشياء لم تعد موجودة، ولهذا السبب ليس لها اسم. ويمكننا أن نتصور اندماجات كيميائية معقدة تم تعريفها اعتباطياً بأسماء كائنات الحمض النووي RNA والبروتين، وكائنات الحمض النووي RNA وDNA، ومخلوقات الحمض النووي RNA وDNA والبروتين، وفيروسات الحمض النووي RNA، وفيروسات الحمض النووي DNA ، والخلايا البدئية الدهنية، والخلايا البدئية البروتينية. وهذه المجموعات الضخمة من الكائنات الحية وشبه الحية كلها ستكون قد وجدت في نظام بيئي واحد مزدهر وفوضوي وتنافسي – إنه زمن التنوع الحيوي *Biodiversity* الأكبر على الأرض، ربما قبل 4-3.9 بلايين سنة، ولكن وجهة نظرنا الجديدة توحي أن ذلك كان في وقت أبعد منه بقليل. فقد خفض الانتخاب الطبيعي ما قد يكون نحو ألف نوع مختلف حقاً من الحياة إلى نوع واحد فقط.

لقد صرّح كريستيان دو دوف Christian De Duve، الحاصل على جائزة نوبل، بأنه بمجرد أن وُجدت المقومات مع الكمية المطلوبة من الطاقة في موقد الأرض البدائية، فقد انبثقت الحياة من اللاحياة بسرعة كبيرة، ربما في دقائق.

5

من المنشأ إلى الأكسجة: ما بين 2.0-3.5 بليون سنة مضت

إن النصف الشمالي من غرب أستراليا هو إحدى زوايا الأرض الأقل زيارة (وسكناً)، وتغطي أراضيه مساحة تقارب مساحة غربي الولايات المتحدة من الجبال الصخرية إلى ساحل الأطلسي. وتلك المنطقة الضخمة قاحلةٌ، وخاصة ذات اللون الأحمر، وتحتوي على بعض المناطق الأكثر أهمية لفهم تاريخ الحياة على الأرض. وأكثر هذه المناطق أهمية هي تلك المواقع التي وجدت فيها أبكر حياة معروفة على الأرض (حتى الآن). وفي منطقة مقفرة معروفة بـ بيلبارا Pilbara تقع تلالٌ قديمةٌ غنية بالحديد المؤكسد لتضفي لمحة بنية قرمزية محترقة على اللوحة الزيتية لبقايا أول فصول الحياة -على كوكبنا على الأقل. وقد تشكلت تلال بيلبارا الحمراء من كميات هائلة من خام الحديد Iron ore – وبسبب ذلك، فالمنطقة هي موقع منجم ضخم على شكل حفرة مفتوحة تُنقب طبقاتها القديمة الغنية بالحديد الذي يشحن معظمه إلى الصين بأسرع ما يمكن تحميله في تعاقب لا نهاية له من سفن الشحن.

ومع ذلك، ففي تلال بيلبارا القديمة أشياء مهمة غير خام الحديد. إذ توجد في هذه الساحة الخالية من الأشجار نتوءاتٌ صخرية اعتقد طويلاً أنها تحتوي على أقدم أحافير أرضية، بما في ذلك رسوبيات الطفل الصفحي أبيكس Apex Shale الموصوفة في الفصل السابق، فضلاً عن أحدث الوافدين إلى سباق "الحياة الأقدم على الأرض"، وهو موقع حوض ستريلي Strelley Pool الذي يبعد أقل من عشرين ميلاً من أبيكس شيرت (صوّان) Apex Chert في بيلبارا.

ولم يجرِ إعلانٌ صريح يتضمن احتواء موقعي أبيكس شيرت Apex Chert وحوض ستريلي Sterlley Pool على أحافير (أو عدم احتوائها عليها في حالة أبيكس شيرت). ومع ذلك توجد في المناطق الريفية المحيطة أدلة لا لبس فيها على الحياة الباكرة حيث المشهد الطبيعي الغني بالستروماتوليت Stromatolites، تلك الرواسب المتراصفة في طبقات مُحدّبة التي تشكلت بفعل ماء ضحل وبقع البكتيريا التي تعيش في المنطقة بين المد والجزر، والتي تعلن عن وجود الحياة – وفي الواقع كانت هي النوع الأكثر شيوعاً من الحياة على الأرض لبعض الوقت بعد تشكلها حتى نحو نصف بليون سنة مضت.

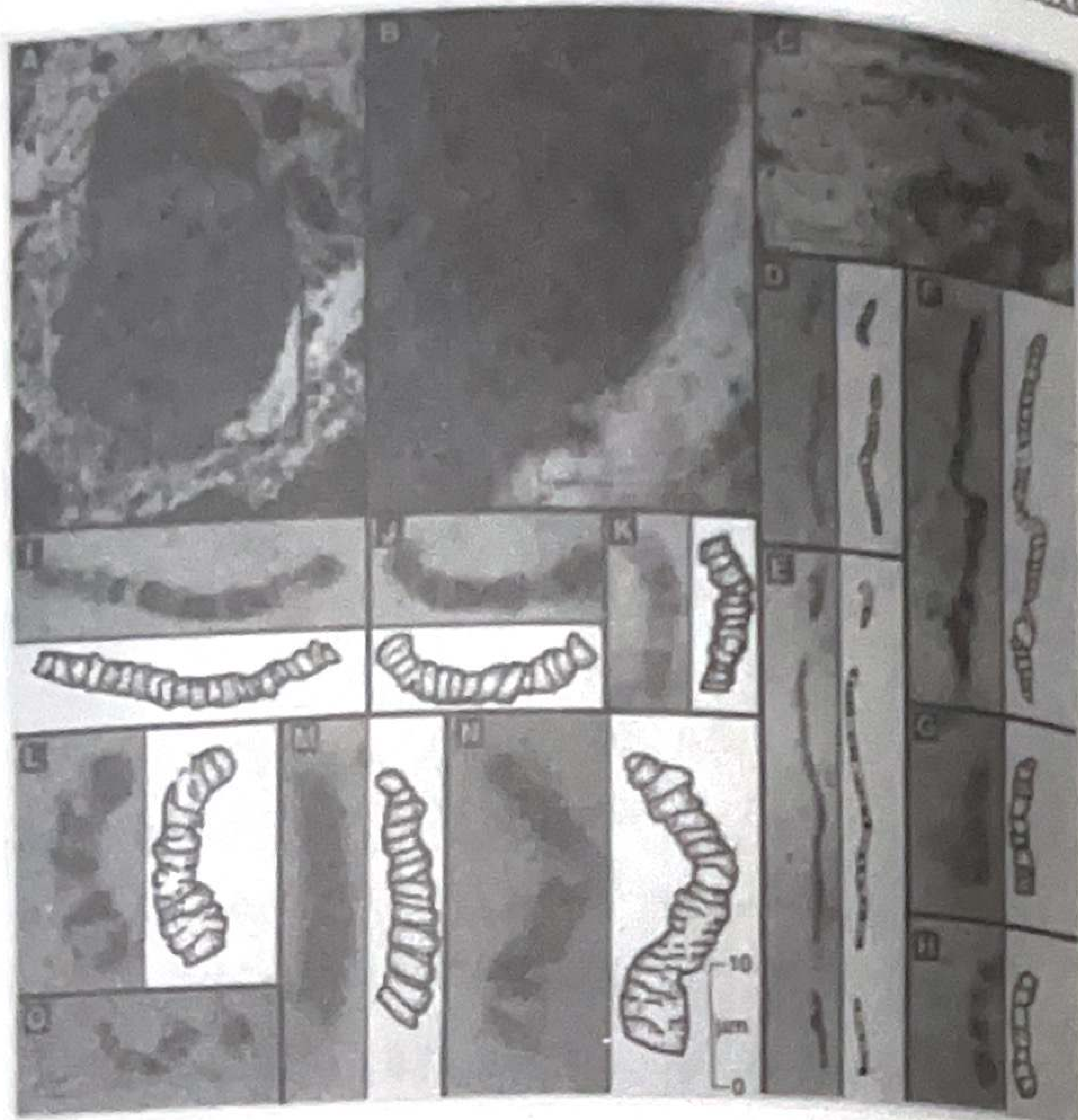
والمفارقة هي، ومن قبيل المصادفة، أنّ غرب أستراليا الذي يقع في نهاية مصب طويل معروف بخليج شاركي باي Sharky Bay هو أيضاً المكان الذي وجد فيه واحد من آخر بقايا المحيطات وآثارها من العالم الأقدم. الكائنات التي عاشت في عالم من دون أي أكسجين ذائب في الماء أو منتشر في الغلاف الجوي على الإطلاق، ولا تزال تعيش حاليا.

إنّ تصادف وجود أقدم حياة أحفورية معروفة مع أفضل الأمثلة على ما ربما بدت عليه الحياة الأقدم، ترك انطباعاً يصعب محوه ويشير إلى أنّ غرب أستراليا هو متحف الحياة الباكرة الأكثر أهمية في العالم. ومنذ أن ظهرت الحياة أول مرة وحتى أول حدث لأرض كرة الثلج تماما، والذي أنهى أساساً الدهر الأركي (السحيقة) Archean era، والسجل الأحفوري لهذه الفترة الزمنية الطويلة الممتدة لأكثر من بليون سنة معروفٌ أساساً بفضل أحافير الستروماتوليت، إضافة إلى أحافير نادرة موجودة ضمن صخور شبيهة بالعقيق تدعى الصوان أو شيرت. وتوجد الستروماتوليت في المنطقتين اللتين أسفرتا عن معظم المعلومات حول طبيعة الحياة الأقدم على الأرض - منطقة المحور لغرب أستراليا ومنطقة في جنوب إفريقيا تدعى حزام الصخور الخضر في باربرتون Barberton Greenstone Belt، الذي يقع قرب حديقة كروغر الوطنية Kruger National Park الشهيرة في جنوب إفريقيا - وكلتاهما تظهر وجود الأشكال القديمة جداً من الستروماتوليت.

وخلال معظم سنوات القرن العشرين اعتقدنا جميعنا أنّ هذه البنى تشكّلت كمنتج ثانوي لحصائر طحلبية Algal mats، تستطيع تحفيز ترسيب الكربونات نتيجة لعملية البناء (التمثيل، التركيب) الضوئي. ولكن العديد من علماء الأرض خلصوا على مدى العقدين الماضيين إلى أنّ بعض البُنى (وليس كل) الرقائقية Laminated Structures الدقيقة يمكن أيضاً أن تتشكل بفعل ترسيب كيميائي مباشر من المحاليل الملحية. ولتمييز تلك الناتجة من عمليات الحياة، فمن الضروري دراسة الشواهد الحديثة، وهي في الواقع قليلة فعلياً.

إنّ أفضل مكان لمراقبة الستروماتوليت الحي حاليا هو في موقع التراث العالمي - مرة أخرى في غربي أستراليا - الذي يدعى خليج شاركي، والمذكور سابقا. وقد وُجدت هناك رواسب (رمل وطين خصوصاً) متعاقبة كبيرة، وفي بعض الأحيان أكوام بعرض متر، فوق مجتمعات من بكتيريا البناء الضوئي وتحتها. وإذا ما قُطع أحد ترسبات هذه الستروماتوليتات نصفين بمنشار الصخور، فسيُظهرُ النصفان طبقات وفواصل طبقية

دقيقة تظهر بعض التموجات المميزة جداً. والستروماتوليت عموماً مستدير الشكل عند قمته، لكن القطع يُبدي تنوعاً مذهلاً من الأشكال والبنى.



الصورة الشهيرة للسجل الأقدم المفترض للحياة الأحفورية كما نشرها بيل شوبف Bill Schopf من جامعة كاليفورنيا في ثمانينات القرن العشرين وتسعيناته. فقد أُرِّخت هذه الأحافير لاحقاً بعمر أكثر من 3.5 بليون سنة، ولكن ذلك التاريخ، وحتى تحديد هوية هذه الأحافير، صار موضع هجوم لاحقاً، (ويُعتقد أن عمرها الحقيقي أحدث ببليون سنة).

ظل العلماء لوقت طويل يشيدون بستروماتوليت خليج شاركي كواحدة من أفضل الطرق لفهم الدهر الأركي (السحيق). ومرة أخرى، نحن نرى آثار الوتيرة الواحدة Uniformitarianism: من المُسلّم بأن بنية هذه البنى وكيمياؤها وبيولوجيتها التي تعيش في الزاوية الساخنة جداً من أستراليا، هي نوافذ على الماضي السحيق، ووجودها هناك لا يُقدَّر بثمن لتفسير الستروماتوليت الأحفوري. ولكن هناك أشياء تخص خليج شاركي لم يرد ذكرها أو وصفها فيما لا ينتهي من البرامج التلفزيونية الخاصة والمعالجات المكتوبة والمصورة لهذا الموقع. وهذه الأشياء ليست بالتأكيد نموذجاً لمحيطات الحقبة

السحيقة، وأهمها هو هوية سائر الكائنات الحية التي تقطن المناطق الأكثر أهمية الحاملة للستروماتوليت في خليج شاركي باي (فالخليج ضخم، ويغطي أكثر من 2.2 مليون فدان مربع)، وهي أيضاً تذكارات لما كان من الممكن أن تشبهه الحياة على الأرض في البليون الأول لوجودها على الأقل.

حياة العصر الأركي (السحيق) ومسار الأكسجين

أثرت تغيرات كثيرة في الأرض وتاريخ الحياة الطويل منذ نحو 2.5 بليون سنة - وكانت تغيراتٍ شديدة التعاقبية هي التي تحدد حقبة جديدة في سلم الزمن الجيولوجي Geological time scale. إن المرحلة الأقدم هي دهر الهيديان (الجهنمي) Hadean Era، والتي بدأت مع تشكل الأرض منذ 4.567 بليون سنة وانتهت مع ظهور سجل الصخور الأول، قبل نحو 4.2 بليون سنة. وبعد ذلك جاءت الدهر الأركي (السحيق) Archean، الزمن العنيف في تاريخ الأرض، والتي بدأت مع بداية القصف العنيف وانتهت قبل نحو 2.5 بليون سنة مع مرحلة التالية التي دُعيت بدهر الطلائع (طلائع الحياة/الحياة المستترة) Proterozoic. وتزامن التحول من الدهر الأركي (السحيق) إلى دهر الطلائع تقريباً مع زيادة في الأكسجين الذي أنتجته حياة البناء الضوئي.

البناء الضوئي هو العملية التي تستخدمها الحياة لتحويل ثاني أكسيد الكربون الخامل إلى مادة خلوية حية (وبذلك تُغير الكربون غير العضوي إلى ما ندعوه الكربون العضوي). ويوجد دليل على أنّ نوعاً ما من كائنات البناء الضوئي الحية وُجد خلال الدهر الأركي (السحيق)، منذ نحو 4.2 - 2.5 بليون سنة، عندما تطورت الحياة للمرة الأولى. ويبدو جلياً أيضاً أنّ تطور البناء الضوئي جاء بعد حياة أقدم. وربما تكون الحياة الأولى قد استخدمت الهيدروجين في مركب يندمج فيه الهيدروجين كيميائياً في ذرة كبريت لتُنتج المكون المهم جداً (لتاريخ الحياة)، والذي يدعى كبريتيد الهيدروجين، لتلبية احتياجاتها من الطاقة.[1] فالهيدروجين غنيٌّ بالطاقة، ولهذا تحاول التكنولوجيا البشرية تسخيره في كل شيء، من السيارات إلى محطات توليد الطاقة. ونعرف أيضاً أنّ الكائنات الحية في الدهر الأركي (السحيق) استخدمت على ما يبدو العناصرَ الأكثر احتياجاً من قبل الحياة، والتي لا تزال الحياة تستخدمها حالياً: الكربون، والكبريت، والأكسجين، والهيدروجين، والنيتروجين.

لدينا بعض المعلومات عن طبيعة المحيطات والغلاف الجوي قبل نحو 3.5 بليون سنة، وربما كان تركيز ثاني أكسيد الكربون وقتها أعلى بكثير مما نراه حاليا. وربما كان هناك قدر كبير من بخار الماء في الغلاف الجوي، فضلاً عن غاز الميثان، وذاك النوع من الغلاف الجوي يحبس الحرارة، وبذلك يبعث الدفء في الكوكب في زمن كانت فيه الشمس أقل طاقة بكثير. ودون غازات دفيئة Greenhouse gases تلك من الدهر الأركي (السحيق) - بخار الماء والميثان وثاني أكسيد الكربون - لم يكن الماء السائل ليوجد على الكوكب. فغازات الدفينة خلقت آلية تسخين لم يكن للكوكب دونها أن يمتلك، بأي طريقة أخرى، غلافاً جوياً يستطيع حبس الحرارة. وكان أيضاً غلافا جويا دون أكسجين.

جاء الكثير من فهمنا للحياة خلال هذا الفصل الطويل من الدهر الأركي (السحيق) من دراسة بيئات العالم الحديث التي تبدو كأنها أمثلة شبيهة مفيدة. فالبيئات منخفضة الأكسجين نادرة نسبياً في محيطاتنا حاليا، لكنها أكثر شيوعاً بكثير في البحيرات الأصغر. وفي الواقع، فالعديد من بحيرات العصر الحديث متعدّدة الطبقات Stratified بالأساس حيث توجد طبقة رقيقة من الأكسجين (ممتصة من الهواء) وتحتها الماء الذي لا يحوي الأكسجين مطلقاً. وقد سلطت دراسة المجتمعات الميكروبية التي تعيش في هذه الأنماط من البيئات أضواء على ما ربما كانت عليه الحياة في الماضي السحيق. وترتبط واحدة من المجموعات المهمة من الكائنات الحية الضرورية لدورة الكربون Carbon cycle في بحيرات العصر الحديث، وعلى الأرجح في المياه القديمة في محيطات الدهر الأركي (السحيق)، بالمركب الكيميائي الميثان. وكما لوحظ مبكرا، فغاز الميثان يساعد على التقاط الحرارة المنعكسة عن الأرض من ضوء الشمس ومنعها من التسرب إلى الفضاء.[2] وتستطيع بعض البكتيريا أن تفكك الميثان وتستخدمه من أجل التغذية. وقد استخدمت معظم حياة الأرض البدائية الميثان بهذه الطريقة، لتخبرنا بأنه بعد فترة وجيزة من تطور الحياة على الأرض تنوعت هذه الحياة سريعاً من حيث طرق اكتساب الطاقة، تماماً مثل تطور حصول السيارات على الطاقة - من البخار ثم وقود الديزل ثم الغازولين (والديزل والغازولين مركبات كربونية تحوي الطاقة كما يحويها الميثان تماماً) ثم وقود الهيدروجين. وعلى الرغم من أنّ حضارتنا وصلت مؤخرا إلى مصادر الوقود هذه، إلاّ أن الحياة توصلت إليها أولاً.

يأتي كثير من الأدلة التي تخبرنا عن تاريخ الحياة البكرة على الأرض من سجل الصخور الرسوبية. فعلى سبيل المثال، إحدى سمات الترسبات الرسوبية من الدهر الأركي (السحيق) هي الظهور المتكرر لطبقات حمراء زاهية ضمن صخور رسوبية بعمر الدهر

الأركي (السحيق)، وتدعى هذه الطبقات بالتشكيلات الحديدية المخططة Banded iron formation أو اختصارا BIFs، وهذه الصخور الرسوبية المثيرة للاهتمام لم تُشكل على سطح الأرض بأي شكل من الترسبات الملحوظة خلال 1.85 بليون سنة الماضية باستثناء واحدة أو اثنتين من فترات أرض كرة الثلج في نهاية زمن ما قبل الكامبري، والذي سنصفه لاحقاً بكثير من التفصيل في الفصل المقبل.

لقد ارتبطت رواسب التشكيلات BIF هذه بما يشبه اللغز لفترة طويلة - فحتى تتوزع على نطاق واسع وبرقة، ينبغي أن يكون الحديد ذائباً في الماء - وهذا يعني أنه يجب أن يكون بالشكل المُختزل الأخضر ثنائي التكافؤ *Ferrous*. ومن ناحية أخرى، فترسيبه يعني أنه تعرض للصدأ بتحوله إلى الشكل الأحمر ثلاثي التكافؤ *Ferric*، والذي لا يذوب في الماء على الإطلاق: يرسُب ببساطة في الماء على شكل جسيمات بدلاً من الذوبان فيه، كما يفعل مكعب السكر. والمشكلة هي الأكسجين: يتفاعل الحديد ثنائي التكافؤ فوراً مع الأكسجين الجزيئي الحر لتتشكل الحالة الحمراء ثلاثية التكافؤ. ويخبرنا أي حديد أو ملح معدني حديدي بلون أحمر زاهٍ بأن الحديد شهد هذا التغيير الكيميائي، والذي ندعوه عموماً بالصدأ، وهذا يتطلب دائماً، تقريباً، الأكسجين الجزيئي. فكيف أمكن لتراكيز الأكسجين في مياه المحيط أن تكون منخفضة كفاية لتسمح للحديد بالبقاء بالشكل الأخضر الذائب، وبعد ذلك ليصبح متوفراً لجعله يصدأ؟ فقد كان هذا لغزاً علمياً طويلاً ومحيراً.

ومنذ أكثر من خمسين عاماً، افترضت إحدى أهم الشخصيات في علم الأحياء القديمة لما قبل الكامبري، بريستون كلاود Preston Cloud من جامعة كاليفورنيا في سانتا باربرا، أن الأكسجين اللازم لقلب الحديد ثنائي التكافؤ الذائب إلى حديد ثلاثي التكافؤ جزيئي صدئ في المحيطات، جاء من مجموعة من ميكروبات البناء الضوئي البدائية المعروفة بالطحالب الزرقاء المخضرة Blue-green algae والتي تُدعى اليوم بالسيانوبكتيريا (البكتيريا الزرقاء) Cyanobacteria. وهذه هي الكائنات الحية الوحيدة على الأرض التي تعلمت كيفية القيام بعملية البناء الضوئي المولد للأكسجين Oxygenic photosynthesis الواهبة للحياة، والتي هي حرفياً القدرة على شطر جزيء ماء وتحرير ذرة الأكسجين منه. وقد استعبد بعض من أحفاد هذه الكائنات من قبل كائنات حية أخرى، وهي الآن توفر لنا جميعاً العضيات الخضراء الجامعة للضوء في النباتات وباقي الطحالب. فكل نبات على الأرض الآن يمتلك "كبسولات" صغيرة تطورت من تلك البكتيريا الزرقاء الأولى، لكنها الآن أسيرة

التعايش الداخلي Endosymbiosis وتقدم الخدمات للنبات متعدد الخلايا. فقد تصور بريستون كلاود "واحة أكسجين" عائمة من كائنات البناء الضوئي الدقيقة الأولى، البكتيريا الزرقاء، ويطلق كل منها كمية قليلة من الأكسجين، وعلى مدى مئات الملايين من السنين غيرت جذرياً طبيعة الحياة على الأرض وكيمياء محيطات كوكبنا والغلاف الجوي وحتى الغطاء الصخري. ومع تحرر كل أثر صغير من الأكسجين الجديد إلى بحر الدهر الأركي (السحيق) القديم، انسدلت رقائق صغيرة من الصدأ إلى قاع المحيط، وترسبت ببطء وإصرار لتشكل تلك التشكيلات الحديدية المخططة.

الأكسجين الجزيئي هو واحدٌ من أشد المركبات سمية حولنا، ويعلم أي شخص يتناول مضادات الأكسدة Antioxidants مع مكملات الفيتامينات بأنها تحارب السرطان - والسرطان ينجم عادة عن إتلاف الأكسجين لكيمياء الخلية في الوقت الخطأ والمكان الخطأ ليغيرها بالنتيجة إلى خلية جديدة قاتلة شبيهة بالزومبي. فمضادات الأكسدة ليست شعاراً إعلانياً فحسب، والأكسجين هادم خلوي ومغيّر خلوي وقاتل خلوي بسبب شراسته الكيميائية، ومن ثَمَّ، فكيف أمكن للكائنات الحية المنتجة لهذا السم أن تبقى حية حين أطلقت جزيئات الأكسجين؟

وهذا يقود الآن إلى المشكلة الكلاسيكية "الدجاجة والبيضة": أيُّ شكل للحياة البدائية كان قد طور نظاماً لإطلاق الأكسجين دون امتلاكه إنزيمات واقية مضادة للأكسدة سيكون قد قتل نفسه، ولذلك فأنظمة ضبط الأكسجين يجب أن تكون قد تطورت أولاً. ولكن أكسجين غلافنا الجوي كله قد نتج من البناء الضوئي المطلق للأكسجين، وبناءً عليه، يتعين ألا يكون هناك أي أكسجين قبل هذا ليحفّز تطور الإنزيمات الواقية! لذا لابد من أن يكون هناك مصدر ما غير حيوي ينتج كميات قليلة من الأكسجين الجزيئي تعرضت الخلايا البدائية له في البيئة بعد ذلك، فاستطاعت تدريجياً تطوير أنظمة إنزيمية لتحمي نفسها من هذه السموم بطريقة مشابهة لكيفية حمايتنا لأنفسنا من الأمراض القاتلة بتعريض أنفسنا لكميات قليلة من المرض عندما نكون صغاراً جداً، وهو ما يتيح لجسمنا بناء دفاعاته تدريجياً.

ولكنْ من أين جاء «لقاح» الأكسجين البكر هذا إذا لم يكن من البناء الضوئي؟ إنّ إنتاج الأكسجين بطريقة غير حيوية صعب جداً، لكن إحدى الطرق التي يمكن أن تحقق ذلك هي من خلال تفاعلات كيميائية ضوئية تشارك فيها الأشعة فوق البنفسجية، الأشعة

ذاتها التي تسبب حروق الشمس على الجلد غير المحمي. وستولد الأشعة فوق البنفسجية الضاربة على الماء وجزيئات ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي مستويات ضئيلة من الأكسجين وغيره من المركبات الكيميائية. ومعظم الأشعة فوق البنفسجية الشمسية اليوم تحجبها طبقة الأوزون عالياً في الغلاف الجوي، أعلى بكثير من تلك الطبقات الحاوية على بخار الماء (الذي يتجمد). ولكن لم يكن هناك أكسجين في تاريخ الأرض البكر، ومن ثَمَّ لم يوجد الأوزون، وبذلك لا يوجد فلتر للأشعة فوق البنفسجية. وهكذا، أصابت أشعة فوق بنفسجية قوية جداً قادمة من الشمس الأرضَ فولدت عدداً قليلاً من جزيئات الأكسجين. ولكن، لسوء الحظ، سرعان ما تنطفئ التفاعلات المماثلة لتلك التي تولد الأكسجين؛ مما يجعلها غير مرجحة لأن تستمر لفترة كافية لتولد تأثيراً بيولوجياً، وخصوصاً أن هذا كله يحدث في حمام من الأشعة فوق البنفسجية التي هي جيدة جداً في خلط الحمض النووي DNA وتعقيم أي شيء يضربه. والضروري هو وجود آلية تسمح للأكسجين بأن ينفصل عن باقي المنتجات كلها (وخصوصاً الهيدروجين وأول أكسيد الكربون) قبل استنشاقه.

هناك عمليتان معروفتان بقدرتهما على فعل هذا: أولاً، إذا صعد الماء عالياً في الغلاف الجوي، فإنّ جزءاً مهماً من ذرات الهيدروجين التي تحررت بفعل الأشعة فوق البنفسجية ستسافر بسرعة أكبر من سرعة الإفلات من الأرض، ويمكن أن تتسلل إلى الفضاء. إن ذلك سيسمح بتقطّر خفيف من الأكسجين والأوزون وبيروكسيد الهيدروجين Hydrogen Peroxide لينتشر للأسفل من الأعلى (فهي ثقيلة جداً على أن تتمكن من الإفلات)، لكنها ليست سوى مقدار ضئيل في الواقع. والغازات الاختزالية الناتجة من النشاط البيولوجي ومن الانبعاثات البركانية ستُخمد بسهولة تلك المركبات الأكسجينية قبل أن تتمكن من الوصول إلى الغلاف الحيوي بكثير. أما العملية الثانية؛ فتحدث على سطح الأرض - لكن على سطح ثلاجة جليدية Glacier! ففي القطب الجنوبي اليوم يسمح ثقب الأوزون لطيفٍ أوسع من الأشعة فوق البنفسجية بالوصول إلى سطح الأرض، حيث يمكنها أن تحطم جزيئات الماء لتقوم في نهاية المطاف بتوليد غاز الهيدروجين وبيروكسيد الهيدروجين. يُحتجز هذا البيروكسيد ضمن الجليد منفصلاً عن غاز الهيدروجين. وفي عملٍ مشترك مع طالب دراسات عليا في معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا، داني ليانغ Danny Liang، حسبنا أنّ ما يصل إلى 0.1 في المئة من الجليد خلال الدور الجليدي ما قبل الكامبري قد يكون من بيروكسيد الهيدروجين الذي تحول إلى أكسجين وماء عندما ذاب الجليد.[4] وعلى الرغم من أنّ هذا غير كاف للتنفس، إلا أنه كاف ليحمل الحياة مع أداتها القوية التي ندعوها التطور على

التفاعل. وكما هو مبين أدناه، نعتقد أن البكتيريا الزرقاء الأولى المطلقة للأكسجين قد تطورت خلال تلك الفترات الجليدية قبل الكامبرية، وبالتأكيد يجب أن تكون قد طوّرت حماية من الأكسجين.

في بحث صَدر في عام 2008، قسّم أحد أكثر الباحثين خبرة حول الحياة والأرض البدائية، روجر بويك Roger Buick، من جامعة واشنطن، البدائل المحتملة لزمن حدوث الأكسجة كالآتي: أولاً، تطور البناء الضوئي المولِّد للأكسجين (كما هو شائع اليوم في النباتات الخضراء كلها) منذ مئات الملايين من السنين قبل أن يصبح الغلاف الجوي مؤكسجاً بشكل ملحوظ، لأنه استغرق دهوراً لأكسدة الإنتاج المستمر لغازات البراكين الاختزالية والسوائل الحرارية المائية ومعادن القشرة الأرضية. ثانياً، قبل نحو 2.4 بليون سنة، ظهر ما نشير إليه في هذه الصفحات بحدث الأكسجة العظيم Great Oxygenation Event، مسبباً تغيراً بيئياً فورياً. ثالثاً، بدأ إنتاج الأكسجين من البناء الضوئي أو أي وسيلة أخرى باكراً جداً في تاريخ الأرض، قبل بدء التسجيل الجيولوجي؛ مما أدى إلى الغلاف الجوي للحقبة السحيقة (أكثر من 2.5 بليون سنة) والذي كان غنيا بالأكسجين. وللاختيار بين البدائل هذه، دعونا ننظر إلى السجل كما نعرفه حاليا؛ لأن هذا حاسمٌ لفهم جيد لتاريخ الحياة. وفي الواقع يوجد كثير مما هو جديد حول معرفتنا بهذا التاريخ.

القيود الجيولوجية على حدث الأكسجة العظيم

على الرغم من الاتفاق واسع النطاق على أن تطور البكتيريا الزرقاء كان الحدث البيولوجي الأكثر تأثيرا في هذا الكوكب (حتى أكثر من تطور الخلية حقيقية النواة ومن ثم الحياة متعددة الخلايا Multicellular)، فإن خلافاً مثيراً يسود حول الزمن الحقيقي لحدوث هذا الابتكار البيولوجي الأصيل المؤثر في كل ما بعده. فعلى مدار خمسين سنة مضت أدرك علماء الجيولوجيا أنّ بعضاً من أقدم الصخور الرسوبية المتكونة من رواسب نهرية على الأرض احتوت على حبيبات دائرية من معادن شائعة تُدعى البيريت Pyrite (ذهب المُغفّلين)، فضلاً عن ملح معدني آخر يحوي كميات ضئيلة من اليورانيوم (أطلق عليه اسم اليورانينيت Uraninite). وهذه المعادن غير مستقرة أبداً بوجود الأكسجين (وهي كالحديد، تتعرض للصدأ بسرعة)، ولم توجد قطّ في محيطاتنا المفتوحة المؤكسجة والمساحات الأرضية ما لم تعزل تماماً عن الاتصال بغلافنا الجوي الطبيعي المؤكسج. وقد قاد هذا إلى مفهوم مبدئي

معتقد بأن الغلاف الجوي احتوى على كمية قليلة جداً من الأكسجين حتى وقت ما قبل نهاية مرحلة الدهر الأركي (السحيق)، وربما متأخراً إلى 2.5 بليون سنة مضت أو حتى بعد ذلك. وتتفق معظم المجتمعات الجيولوجية على أنه حتى في تلك التواريخ، كانت تراكيز الأكسجين في الغلاف الجوي منخفضة جداً بحيث أصبح وجود حبيبات البيريت واليورانينيت ممكناً على الأرض وفي البحر دون صدأ. وفي الواقع، فنحن نجد البيريت واليورانينيت بوفرة في الصخور التي نشأت متأخراً حتى 2.5 بليون سنة مضت، وهذا يخبرنا بأنه في تلك التواريخ كانت كمية الأكسجين في الهواء والبحر معدومة. وحتى قبل 2.4 بليون سنة فكلا نوعي المعادن اختفى من الصخور التي نشأت تحت الماء أو في الأرض. ومن ثمّ، فهل هذا يعني أن البكتيريا الزرقاء تطورت فقط بعد 2.5-2.4 بليون سنة مضت؟ فقد قاد هذا إلى تحفيز نقاش علمي عميق شديد الأهمية لفهم تاريخ الحياة.

واحتاجت الإجابة عن هذا السؤال بالغ الأهمية إلى سنوات من البحث. وقد تمحور الخلاف حول ما إذا كانت البكتيريا الزرقاء قد تطورت منذ نحو 2.5 بليون سنة أو ربما بليون سنة أبكر، أي منذ نحو 3.4 بليون سنة، ومن ثمّ حول توقيت ظهور الحياة على الأرض في المقام الأول. وفي أواخر تسعينات القرن العشرين، قدّم الاستخدام الجديد حينها للأحافير الكيميائية، المعروفة أيضاً بالواسمات الحيوية، حلاً على ما يبدو للمشكلة: وجد علماء الجيولوجيا الأستراليون ما خلصوا إلى أنه دليل واسم حيوي Biomarker واضح على ضرورة أنه ربما وجد شيء ما يُنتج الأكسجين في المحيطات الضحلة خلال أواخر الفترة الزمنية الحقبة السحيقة (قبل 2.5 بليون سنة). وأبلغوا عن مستويات بسيطة جداً من الواسمات الحيوية في صخور الدهر الأركي (السحيق) التي تتطلب، على الأقل في المحيط الحيوي العصر الحديث، الأكسجين الجزيئي في سبل التخليق الحيوي؛ والمثال الرئيس هو نوع من جزيئات عضوية تُدعى الستيرولات Sterols.

وكان هذا الاكتشاف فريداً من نوعه لدرجة أننا سنعيد صياغة الملخص من البحث كالآتي: الأحافير الجزيئية (الواسمات الحيوية) من الطبقات الرسوبية التي عمرها 2,700 مليون سنة والموجودة في النوى المأخوذة من الجزء القديم لسجل الصخور الرسوبية العميقة والقديمة الأسترالية تشير إلى أنه عندما ترسبت هذه الطبقات القديمة فعليا كانت في بيئة مشتركة مع بكتيريا بناء ضوئي تدعى البكتيريا الزرقاء. مما يعيد كثيراً إلى الوراء وقت الظهور الأقدم المعروف لهذه النباتات الميكروبية الصغيرة المنتجة للأكسجين. والأكثر غرابة هو وجود نوع ثانٍ من العلامات الحيوية يُدعى الستيرانات Steranes في عينات طبقية

مما قدم دليلاً مقنعاً ليس على وجود أشكال حياة بدائية (طليعية) النواة Prokaryotic فحسب، بل على وجود حقيقيات النواة أيضاً. تلك المجموعة التي تأتي أولى أحافيرها من طبقات قدرت ببليون سنة أصغر من عمر عيّنات الصخور الخاصة بهذه الدراسة.

لقد قدم هذا البحث، الذي نُشر في مجلة ساينس Science المرموقة، نتيجة ثورية جديدة إلى الوسط العلمي لسببين - ليس ظهور البناء الضوئي المنتج للأكسجين في تاريخ مبكر جداً فحسب، بل الاكتشاف الأكثر إثارة للدهشة لواحد من المجموعات أو النطاقات الثلاثة الأكبر للحياة، ألا وهو حقيقيات النواة Eukarya (النطاقان الآخران هما البكتيريا والعتائق، وهما من الميكروبات وحيدة الخلية)، في الصخور القديمة أيضاً. وقد أتت كل هذه الأدلة من عينات من اللب مستخرجة من عمق الأرض. والرسالة المستنبطة من هذا هي أن بكتيريا البناء الضوئي وحقيقيات النوى كانت كلها موجودة في وقت أبكر بكثير مما كان يظن سابقاً، وكلاهما يعود إلى نحو 2700 مليون سنة. وقد أعاد ذلك البحث المثير بضربة واحدة كتابة التاريخ العلمي وتاريخ الحياة كذلك.

لكن العلم قائمٌ على التشكيك والاستفهام. دعونا نقفز نحو عشر سنوات، إلى عام 2008، ونطلع على ورقة أخرى حول هذا الموضوع مع واحد من المؤلفين المشاركين، وهو نفسه يوخن بروكس Jochen Brocks الذي كان مؤلفاً رئيساً للبحث المذكور سابقا في عام 1999، والجملتان البارزتان الاثنتان هنا: "هكذا تعود الأدلة الأحفورية الأقدم على حقيقيات النوى والبكتيريا الزرقاء إلى 1.78-1.68 بليون سنة مضت ونحو 2.15 بليون سنة مضت، على التوالي. إن نتائجنا تدحض الأدلة على البناء الضوئي المولد للأكسجين منذ نحو 2.7 بليون سنة، وتستبعد أدلة الواسمات الحيوية السابقة التأخير الطويل (نحو 300 مليون سنة) بين ظهور البكتيريا الزرقاء المصنعة للأكسجين والارتفاع في أكسجين الغلاف الجوي قبل 2.45-2.32 بليون سنة."

فرق كبير! فما الذي حدث بين عامي 1999 و2008 وتسبب بتغيير الموقف العلمي المفاجئ هذا؟

تعرضت دراسات الواسمات الحيوية الأصيلة من أواخر تسعينات القرن العشرين للانتقاد من عدة نواحٍ، بما في ذلك حقيقة أنّ العديد من المسارات الكيميائية الحيوية القديمة التي لا تستخدم الأكسجين خضعت لـ"التحديث" بعد حدث الأكسدة العظيم لإدراج الإنزيمات التي تعمل. إلا أنّ المشكلة الحقيقية مع دراسات الواسمات الحيوية لم تكن

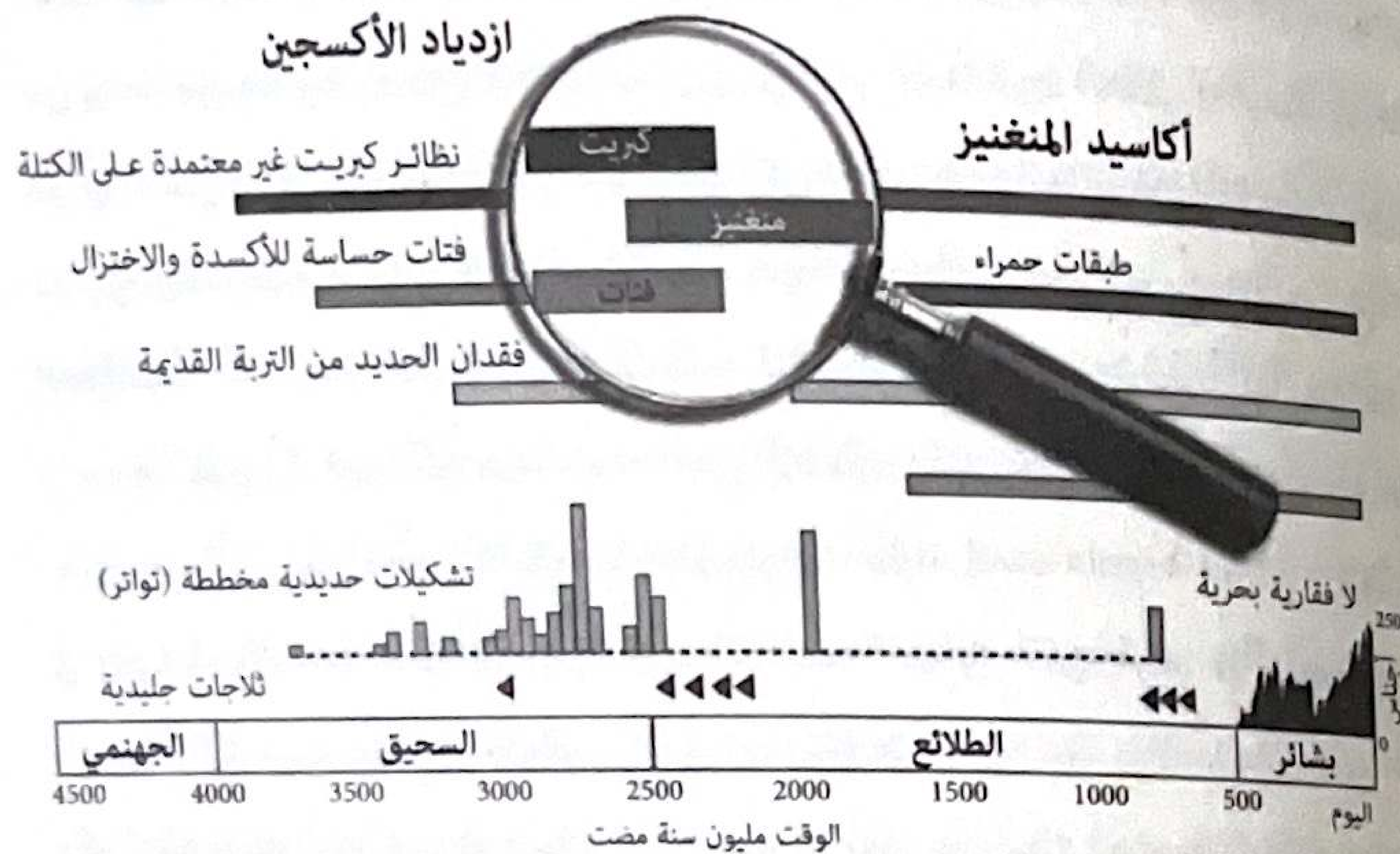
تحليل ما كانت تضمه العينات، بل المنهجية المستخدمة للحصول على تلك العينات. فقد وجد الباحثون واسمات حيوية ثمينة، حسناً، لكن متى تم بالضبط دخلت هذه الواسمات الحيوية في العينات؟ ليست الصخور تكوينات غير مُنفِذة وصلبة ودائمة كما نفترض عادة، بل توجد غالباً في الواقع في بيئات تحدث فيها التبدلات الكيميائية - والتلوث لاحقاً. ولم يكن هناك بعد في أواخر تسعينات القرن العشرين تقدير كاف للحاجة الملحة إلى اختبار فرصة التلوث الأحدث - واستبعادها - في هذه العينات القديمة، وخصوصاً عندما تكون الواسمات الحيوية المزعومة موجودة بتراكيز أقل مما هي عليه في الهواء المحيط.

وبذلك كانت إحدى الهزات التي تعرض لها مجتمع الاتجاه السائد للواسمات الحيوية، أن غيّر أحد نجومه الصاعدين - يوخن بروكس من الجامعة الوطنية الأسترالية - نبرته فجأة في عام 2005 (مما أدى في النهاية إلى مقالة 2008 التي استشهدنا بها سابقا) مجادلاً في أن أطروحته التي وثقت وجود الواسمات الكيميائية للعتائق عانت التلوث! وهذا بدوره قاد واحدة من كبريات وكالات تمويل علم الجيولوجيا (معهد أغورون Agouron Institute) إلى دعم دراسة نقدية علمية لإعادة مشاريع جمع عينات الواسمات الحيوية باستخدام وسائل جديدة لاختبار التلوث. والنتيجة هي (حتى كتابة هذه السطور في منتصف عام 2014) عدم العثور على واسمات حيوية. وفي الواقع، وفي اجتماع عُقد في آخر عام 2013، كُشف عن مصدر التلوث وهو شفرة المنشار من الفولاذ المقاوم للصدأ، والذي جعلته (الشركة المصنّعة) مقاوماً للصدأ عبر التشريب بالضغط العالي بمنتجات بترولية! وحتى كتابة هذه السطور، لم يطور مجتمع الواسمات الحيوية اختبارات صارمة لإثبات أن الواسمات الحيوية العضوية في صخور الدهر الأركي (السحيق) - أياً منها - تعود إلى زمن تراكم الرسوبيات.

وقد قاد استخدام أداة من نوع جديد لتاريخ الأرض: مقارنة تراكيز نظائر الكبريت، إلى تأطير صورة كبيرة أخرى من النقاش الكبير حول منشأ الأكسجين الجزيئي في الغلاف الجوي. فقد شاهدنا بالفعل (وسنرى مرة أخرى في قسم الانقراض الجماعي) أنّ مقارنة تركيبات نظائر الكربون مفيدة لدراسة الحياة، وكانت أيضاً مفيدة في محاولة اتخاذ قرار حول زمن ظهور الحياة أولاً على الأرض، لأن الخلايا الحية تفضل نظائر محددة من نوع الذرة ذاتها (مثل الكربون أو الأكسجين، وكما نشهد هنا، الكبريت) عن بقية النظائر الأخرى من هذا العنصر نفسه. ففي التفاعلات الكيميائية العادية، تتحرك النظائر الخفيفة عبر سلسلة التفاعلات أسرع قليلاً من النظائر الثقيلة؛ لأن العناصر الأخف تملك روابط كيميائية

أضعف قليلاً قد تتشكل وتتكسر بشكل أسرع لتنتج معدلات تفاعل أعلى، ولذلك فالنباتات تفضل النظائر الأخف للكربون والأكسجين على ما لديها من النظائر الأثقل قليلاً. نظائر شقيقة أكثر كتلة. وفي عام 2000 قدّم جيمس فوركوار James Farquhar ومارك ثيمنس Mark Thiemens وزملاؤهما، من جامعة كاليفورنيا في سان دييغو، طريقة جديدة لاستخدام الأرقام النسبية لنظائر الكبريت الموجودة في صخور عمرها معروف لتخبرنا عن الزمن المحتمل لظهور أنواع معينة من الحياة.

قام فوركوار وثيمنس بتحليل نمط نظائر الكبريت في الصخور الرسوبية من الدهر الأركي (السحيق) إلى زمن الحقبة الأولية؛ فوجدا تباينات كبيرة في نظائر الكبريت لما قبل نحو 2.4 بليون سنة. ولكن التقلبات تختفي في الصخور الأصغر عمراً، وأفضل تفسير هو أن هذا التغيير كان بسبب نقص الأشعة فوق البنفسجية الضاربة لجزيئات ثاني أكسيد الكبريت SO_2 في الغلاف الجوي الأرضي. وحدوث هذا ممكن فقط عبر تشكل - التشكل الأول حينها - طبقة الأوزون الموجودة إلى يومنا هذا. وإذا لم يكن هناك أكسجين، فلن يوجد فلتر الأوزون، والآن نحن نمتلك دليلاً على عدم وجود طبقة أوزون قبل نحو 2.4 بليون سنة. وبعد ذلك بدأت العديد من المؤشرات الرسوبية الأخرى توحي بوجود أكسجين الغلاف الجوي.



الفترة المتداخلة للإشارات الكيميائية الأرضية المتناقضة لظهور الأكسجين. وتترافق حبيبات البيريت واليورانينيت الدائرية بحجم الطمي، والتي تعطب سريعاً من أصغر نفحة من الأكسجين، مع النبضات الأولى للمنغنيز الرسوبي الذي يحتاج طبيعياً إلى الأكسجين الجزيئي. وقد تكون هذه الفترة المتداخلة (ضمن العدسة المكبرة) إشارة إلى بكتيريا بناء ضوئي مرسبة للمنغنيز، والتي ستكون حجرا تطوريا مهما في الطريق نحو البناء الضوئي المولد للأكسجين (فبإذن من وود فيشر - معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا).

إذن، لم يكن هناك أي أكسجين قبل 4.2 بليون سنة، أو على الأقل ما يكفي منه لخلق طبقة الأوزون. ولكنْ هل كانت هناك أي سيانوبكتيريا في أي مكان على الإطلاق؟ ربما لا. وعندما اتضح أن برنامج الحفر العلمي الكبير في جنوب إفريقيا (بتمويل من معهد أغورون المذكور سابقا) لم يتوصل إلى أدلة على حدث الأكسجة الكبير، سمحوا للفريق بحفر عينتين إضافيتين عبر رواسب أحدث عمراً قليلاً في جنوب إفريقيا وقعت العينتان بالتأكيد على هذا الحدث. وهذه الفترة هي المرحلة الزمنية بين 2.2 و2.4 بليون سنة، الجزء الأبكر لما يدعى حقبة الطلائع القديمة Paleoproterozoic، وقد وجد الفريق شيئاً غريباً نوعاً ما. وكما ذُكر سابقا، فمعادن البيريت واليورانينيت ونظائر الكبريت مؤشرات قوية جداً على غياب الأكسجين، والنهاية الأخرى لهذا الطيف هي عنصر المنغنيز Manganese، الذي هو عادة مؤشر قوي مكافئ على وجود الأكسجين الجزيئي الحر. والبيانات الجديدة تظهر مستويات وفيرة من أكسيد المنغنيز الرسوبي، لكن في الصخرة نفسها التي تظهر المؤشرات الأخرى على غياب الأكسجين!

غير أنّ الأمر كان أكثر تعقيداً. فقد قرّر زميلنا في معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا (كال تيك Caltech) وود وورد فيشر Woodward Fischer، الذي يعمل مع طالبة الدراسات العليا جينا جونسون Jena Johnson وخريج كال تيك سام ويب Sam Webb (المسؤول عن واحد من خطوط إشعاع التحليل المجهري في مسرع ستانفورد الخطي)، البحثَ إلى ما هو أبعد من ذلك.[5] واتضح أن الرواسب ذاتها التي تحوي هذه الكتلة من المنغنيز الرسوبي تحتوي أيضاً على حبيبات فتاتية من حجم حبيبات الطمي من البيريت واليورانينيت الحطامية وآثار نظائر الكبريت التي تتطلب غياب الأكسجين الحر (حسناً، أقل من جزء واحد في المليون). فلم يكن هذا متوقعاً على الإطلاق، لكنه زاد الأمور سوءاً. وبعمله مع زميل آخر تركي من معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا، مايك لامب Mike Lamb – الخبير في الفيزياء الأرضية لنقل المعادن خلال الترسيب –نسبوا عائق غياب الأكسجين هذا إلى نظام الترسيب بكامله. فالطمي الذي سحبنا العينة منه عند حافة الدلتا يجب أن يكون قد تآكل أصلاً من قارة ما في مكان ما، ثم نُقل عبر نظام نهري وتيارات متعرجة ومصبات الأنهار الساحلية والبيئات الرسوبية القريبة من الشاطئ ثم إلى مجرى بعيد للدلتا. ولم تكن أي من هذه البيئات لتحتوي على حتى جزء واحد في المليون من الأكسجين الجزيئي[6] (وبذلك كان واضحاً عدم تأثره بالمياه الذائبة الجليدية التي ربما كانت قليلة). إن المتطلبات الغذائية للسيانوبكتيريا الأكسجينية معروفة جيداً –وهي بشكل أساسي

الحديد والفوسفور[7] – وقد كانت متوفرة في العديد من الأماكن على طول هذا المسار الرسوبي. وأنتجت تلك البكتيريا الزرقاء كميات وفيرة من – فقاعات – الأكسجين خلال نموها. وإذا كانت أي من «جزر البناء الضوئي الأكسجيني» هذه قد وجدت حقاً، فأين ستكون؟ المكان الأسوأ لنموها سيكون بعيداً في البحر، بعيداً عن هذه المصادر الغذائية. تلك كانت وجهة نظرة بريستون كلاود المذكور سابقا، لكن بصراحة لا معنى لها في هذا السياق. فنجاة تلك المؤشرات الرسوبية على نقص الأكسجين غير متوافقة أبداً مع ظهور الأكسجين والبكتيريا الزرقاء في أي مكان في البيئات التي سافرت هذه الحبيبات عبرها.

إذن، وما الحل لهذه المفارقة؟ نحن نعتقد أن النظام المُطلِق للأكسجين في البكتيريا الزرقاء لم يكن قد تطور في ذاك الوقت (2.4 بليون سنة مضت)، لكن العديد من الخطوات التطورية اللازمة للوصول إلى هذا النظام كانت قد حدثت بالفعل. فقد اتضح أن المُركب الكيميائي الحيوي الفعلي في البناء الضوئي المولد للأكسجين الذي يجمع الطاقة لفصل الماء، مُطلقاً الأكسجين، يعتمد على عنقود من أربع ذرات منغنيز أضيفت إليها ذرة كالسيوم. وعندما تم تصنيع هذا البروتين من الصفر في النباتات الحية، امتصّ المركب ذرات المنغنيز، ذرة بعد أخرى، بمساعدة الفوتونات التي تؤكسدُها. واقترحنا أن هذه الرشقات الفريدة للمنغنيز في الرواسب (لا النفحات الخجولة) قد تكون ناتجة من السلف التطوري للسيانوبكتيريا الذي يتغذى بالمنغنيز المُختزل الذائب في الماء ويستخدمه كمصدر للإلكترونات اللازمة للبناء الضوئي.[8] ومن المعروف أن العديد من بكتيريا البناء الضوئي البدائية تقوم بذلك باستخدام كبريتيد الهيدروجين H_2S والكربون العضوي والحديد ثنائي التكافؤ، لكننا لم نعثر بعد على أيّ بكتيريا تستطيع استخدام المنغنيز. وسيترك البناء الضوئي من هذا النوع كميات كبيرة من ناتج ثانوي – أكسيد المنغنيز – وراءه في الرواسب لكن دون أن تطلق الأكسجين الجزيئي الذي سيدمر البيريت واليورانينيت الرسوبيين أو يشكل فلتر أوزون لتغيير كميات الكبريت. إن فترة التداخل هذه، حيث وجد المنغنيز الرسوبي مع حبيبات فتاتية دائرية من معادن البيريت واليورانينيت، جرت في فترة قصيرة واحدة (وفقط واحدة) من الزمن الجيولوجي بين نحو 4.2 و53.2 بليون سنة مضت.[9] وإذا كان هذا فعلاً هو الزمن الذي تطور فيه ذاك البروتين، فإنّ باقي الاقتراحات غير المباشرة الأخرى كلها عن البناء الضوئي المولد للأكسجين الباكر ستكون خطأ. وهذا تفسير جديد ومثير للجدل نطرحه هنا، لكننا واثقون بأنه التفسير الصحيح.

في نموذجنا، هيمن هذا الميكروب المُؤكسِد للمنغنيز - والجديد وقتها على العالم نتيجة لطفرة ما جديدة عشوائية في أغلب الظن - على النظام البيئي لبضعة ملايين من السنين، وحتى تمكن من استنفاد المنغنيز الذائب في مياه السطح. ومن خلال إعادة ترتيب كيميائية حيوية ما، صار هذا النوع الجديد الصغير من الميكروبات قادراً على انتزاع الإلكترونات مباشرة من جزيئات الأكسجين، مطلقاً كميات كبيرة من الأكسجين الجزيئي في العملية. ومن شأن هذا النوع أن يكون البكتيريا الزرقاء الأولى الحقيقية. ولأن الماء موجود أساساً في كل مكان، فنموها لن يعود مُحدَّداً بإمدادات مانحات الإلكترونات في البيئة، ويحتاج فقط إلى مستويات بسيطة جداً من الحديد والفوسفات. ولكن خلال تلك الفترة من الزمن، توجد تسجيلات واضحة لترسبات الثلاجات الجليدية، وتلك الترسبات تحوي كثيراً من الحديد والفوسفات وباقي المغذيات لهذه البكتيريا الزرقاء الجديدة لتنمو عليها. وفي الواقع، فهذا النمو المُخصَّب جليدياً سيكون قادراً على تدمير دفيئة الكوكب في أقل من مليون سنة بإزالة غازين مُهمَّين، ثاني أكسيد الكربون والميثان، بسرعة أكبر كثيراً من أن تسمح للنظام باستردادها.[10] ونتيجة التدمير المفاجئ لدفيئة الكوكب هي الدخول في دور جليدي عالمي يُسمَّى حدث «أرض كرة الثلج».

نعتذر على الكيمياء المعقدة الضرورية في القسم السابق، ولفهم هذه القصة بطريقة صحيحة نحتاج هنا إلى التعقيد. وكما نرى الآن، فالعالم قد تغير بشكل قاطع من هذه النقطة فصاعداً.

كرة ثلج من الجحيم

في تاريخ الأرض كلها، نادراً ما شاهدنا تراصفا طبقيًا في المحيطات (حيث توجد في المحيط طبقة صغيرة رقيقة علوية مؤكسجة، وتبقى الطبقة الأدنى، والأكثر سمكا بكثير، دون أكسجة) عند تجمّد قطبي الأرض عند خطوط العرض العليا. إذ يهبط الماء البارد في القطبين إلى الأسفل محرضاً الدوران. وإضافة إلى ذلك، فالثلاجات الجليدية بحد ذاتها جيدة جداً في طحن الصخور القارية إلى مسحوق وإلقائها مجدداً في المحيط، حيث تصبح الجسيمات الدقيقة للحديد الصدئ والفسفور، من المكونات الرئيسة نفسها للأسمدة التي نستخدمها اليوم في المسطحات الخضراء والحدائق. وتظهر صور الأقمار الاصطناعية للجبال الجليدية المنصهرة ازدهاراً في البناء الضوئي نشاط في أعقابها، مؤكدة التأثير القوي في القدرة الإنتاجية للمحيطات والتي لا يمتلكها إلا القليل من صخور اليابسة. ويدور

حتى اليوم نقاش كبير حول تأثير تجربة ردم حديد غير مشروعة في شمال غرب المحيط الأطلسي في عام 2012 في هايدا غواي (سابقاً جزر الملكة شارلوت) والتي تبعتها لاحقاً، بعد سنتين فقط، زيادة كبيرة في سمك السلمون.

خلال الدهر الأركي (السحيق) وباكراً خلال دهر الطلائع كانت هناك عدة فترات جليدية كبرى قبل حدث الأكسدة العظيم، بما في ذلك ثلاث أحداث صغيرة من نحو 2.9 إلى 2.7 بليون سنة مضت، وأحداث عديدة أكثر بين 2.45 و2.35 بليون سنة مضت. وعملية حسابية بسيطة تقترح أن كمية الحديد والفوسفات المُلقاة في المحيطات خلال أيٍّ من أحداث اكتساح الجليد تلك ستكون أكثر من كافية للسيانوبكتيريا - إن كانت قد تطورت عندها - لتكتسح تماماً بيئة السطح منقوص الأكسجين، وتقلِب الغلاف الجوي الكوكبي ومحيط السطح إلى حالة مستقرة غنية بالأكسجين كاليوم؛ ستكون قد احتاجت إلى أقل من مليون سنة لفعل هذا.[11] وحقيقة أن ذلك لم يحدث آنذاك هي دليل قوي آخر لتبرير أنّ البناء الضوئي المُولِّد للأكسجين لم يكن قد تطور بعد.

تأتي العقبة الأبكر والأكثر صرامة أمام وجود أكسجين في الغلاف الجوي من وجود ترسبات واسعة من معادن المنغنيز معروفة بحقل منغنيز كالاهاري Kalahari manganese في جنوب إفريقيا، والمؤرخ قبل 2.22 بليون سنة، في الحوض نفسه الذي أخذ منه برنامج حفر أغورون العينات. إنّ هذه الترسبات هائلة، غطاء بسماكة خمسين متراً يغطي قرابة 500 كيلومتر مربع، ترسبت على الجرف القاري دون أي أثر لفتات البيريت واليورانينيت، أو نظائر كبريت غريبة غير اعتيادية. وربما قد تشكلت فقط في غلاف جوي غني بالأكسجين، وبذلك فهذا يعطينا التاريخ الأقدم الذي نحن واثقون عنده من وجود عالم البكتيريا الزرقاء وفلتر الأوزون والأكسجين في البحر والهواء.

وبين هذا الترسب وتقاطعها مع فترة المنغنيز الأساسية، يَكمُن وحشٌ غريبٌ آخر - دور جليدي شديد الحدّة لدرجة أنه وصل إلى المناطق المدارية[12] وقاد على الأرجح إلى تجميد سطح المحيط بكامله مشكلاً أولى حلقات أرض كرة الثلج.[13]

سُمِّيت الحلقة الأولى لأرض كرة الثلج هذه في الواقع من قبل المؤلف المشارك كيرشفنك، وربما استمرت قرابة مئة مليون سنة.[14] ومن ثَمّ، فما هي أرض كرة الثلج؟ في الواقع كانت قد اكتشفت أولاً في الصخور الأصغر عمراً.

نعلم اليوم أن الترسبات الجليدية أُنتجت بين 717 و635 مليون سنة مضت، ويمكننا الآن العثور عليها تقريباً في القارات جميعها. فالعالمان الجيولوجيان اللّذان

اشتغلا في النصف الأول من القرن العشرين، هما برايان هارلند Brian Harland من المملكة المتحدة ودوغلاس موسن Douglas Mawson من أستراليا، أدركا مبكراً أنه كان يوجد دور جليدي كبير تحت الكامبري Infra-Cambrian ice age يبدو أنه احتوى على امتداد عالمي كبير غير اعتيادي. وعلى الرغم من إدراكهما للملامح الواضحة لنشأة جليدية لا لبس فيها - مثل الحجارة المتساقطة Drop stones وصخور التيليت Tillites والأرضيات المخططة بفعل الثلاجات الجليدية في قاعدة الوحدات - فقد كانت هناك سمات عديدة لهذه الترسبات مثيرة للحيرة. فالعديد من الكسيرات تكونت من حجارة جيرية لمياه ضحلة، وكثير منها كما لو أن الثلاجات الجليدية قد تقدمت فوق منصات كربونية كتلك الموجودة في الباهاما (التي تتشكل اليوم فقط في المناطق المدارية)، محطمة قطعاً وحاملة إياها بعيداً. وترافقت كذلك مع وجود غير اعتيادي لصخور الحديد المخططة الشبيهة بتلك التي اختفت من الأرض قبل نحو بليون سنة من ذلك، وكانت الرسوبيات الجليدية عادة مغطاة بطبقات من حجر الجير (مرة أخرى، «بصمة» للتشكل في خطوط العرض الدنيا). وفي مقالة مراجعة Review article في عام 1964، ونشرت في مجلة ساينتفيك أمريكان *Scientific American*، دافع هارلند عن فكرة أن الثلاجات الجليدية يجب أن تكون قد بلغت خط الاستواء لأن بعض الترسبات كانت ستصبح في خطوط العرض الدنيا بغض النظر عن انقلاب محور دوران الأرض. ورفض هارلند أيضاً، خصوصاً، فكرة أن المحيطات ربما تجمدت كلياً؛ لأن من شأن هذا استدعاء «كارثة الثلج» التي أكدت النماذج المناخية أن الكوكب لن يستطيع الهرب منها مطلقاً.

لقد كان قياس خط عرض القارات في الماضي من اختصاص فرع من فروع الفيزياء الأرضية Geophysics يدعى المغناطيسية القديمة Paleomagnetism، ويدرس السجل الأحفوري للحقل المغناطيسي للأرض. ومجال الأرض عمودي عند القطبين، لكنه أفقي عند خط الاستواء. وبذلك، فحساب زاوية الحقل المغناطيسي في الوقت الذي تشكلت فيه الصخرة مع الالتزام (بأفقية) مستوى التطبق Bedding plane، يقدم تقديراً لخط العرض في الوقت الذي تشكلت فيه الصخور. ومن الضروري، مع الأسف، القيام بالإثبات الفعلي لكون المغناطيسية التي تم قياسها قديمة قدم الصخرة ولم تتشكل خلال التجوية Weathering الحالية أو بعض الأحداث التحولية Metamorphic event. (لتكون ذات مغزى، يجب أن ندرس الأشياء التي تعود فعلياً وحقيقةً إلى الوقت الذي تشكلت فيه الصخرة. وهذا هو العيب في دراسات الواسمات الحيوية لدهر ما قبل الكامبري المشار إليها سابقاً).

إن إمكانية اختبار فرضية التجمد في خطوط العرض الدُنيا اجتذبت اهتمام العديد من المحاولات الباكرة لتحليل المغناطيسية القديمة Paleomagnetic، إلا أن صيغة جديدة للعلوم الجيولوجية اقترحت في عام 1966 - وهي نظرية الصفائح التكتونية. فإذا كانت القارات قادرة على التحرك نسبياً فيما بينها، فسيكون ممكناً أن الرسوبيات الجليدية لما قبل الكامبري كلها قد تشكلت واقعياً في القطبين، وتكتونية الصفائح استطاعت نقلها إلى موضع ظهورها في خطوط العرض الدنيا. وسقطت من أساسها فكرة الدور الجليدي لخط العرض المنخفض لما قبل الكامبري من شاشة الرادار الجيوفيزيائية، وبدت فقط مطلباً بعيد المنال للعلماء الذين يدرسون الأرض البدائية.



مثال لرصف مخطط من حدث "أرض كرة الثلج" الأول في تاريخ الأرض، الدور الجليدي الماكانيني Makganyene في جنوب إفريقيا. وفي هذه الصخرة مواضع متعددة من تخطيطات متوازية باتجاهات مختلفة، ومنحوتة على جميع الأسطح. من المعروف أنّ الأنماط المشابهة لهذه تتشكل فقط على الحصى التي سُحبت على طول الصخر القاعدي في أسفل ثلاجة جليدية متحركة نشطة. ومجموعات الأخاديد المتراصفة بأشكال مختلفة تشكل في كل مرة الصخرة لتكتسب اتجاهاً جديداً مختلفاً في قاعدة الجليد. ومعظم هذه الحجارة قد طحنت تماماً إلى غبار جليدي؛ وهذه كانت محظوظة بما يكفي لنجاتها.

كانت هذه هي الحال حتى عام 1987 عندما برهن تحليل مفصل لعينات جديدة مأخوذة مباشرة من صخور جليدية في أستراليا على أنّ الاتجاه المغناطيسي لخط العرض المنخفض كان قد وجد قبل تحول الرواسب من طين إلى صخر. فقد كانت تلك النتيجة الأولى المنيعة الدالة على التموضع الاستوائي لدور جليدي واسع النطاق بمستوى سطح البحر. ولو أنّ الأرض تجمدت عند خط الاستواء؛ لتعيَّن عليها أن تكون حتى أبرد كلما اتجهنا نحو القطبين. ومع هذا الزخم، حدث تغير في النظرية العلمية. فبمجرد وجود

القبول بأنه ربما غطى الجليدُ العالمَ في الماضي السحيق، فإن المعلومات المتوفرة من توزيع الأحافير، وأنواع الصخور، وحتى بيانات المغناطيسية القديمة، ستبدو أكثر منطقية، ولكنها بقيت تضع كتلاً قارية كبرى على خط الاستواء، والنموذج المقبول عموماً للثلاجات الجليدية الزاحفة على طول القارات (ولم تغطِ المحيط قط) من خط العرض العالي حتى وصلت خط الاستواء ببساطة لم تتفق مع هذه البيانات.

ومع إعادة تفحّص مختلف احتمالات كيفية إنتاج العالم لترسبات جليدية على خط الاستواء، صار واضحاً، على الأقل لبعض العلماء الدارسين لهذا الوقت، أن الأرض قد تجمدت كلياً بالتأكيد. وبمجرد الإيمان بتلك الفكرة، انتظمت بقية الأدلة. فكومة الجليد العائم ستغطي سطح المحيط، مُحددةً البناء الضوئي، وخانقةً تبادل الغازات مع المحيط المدفون تحتها وجاعلة قاع البحر ناقص الأكسجين. وستراكم النفاثات الحرارية المائية على قاع البحر عندها تدريجياً تراكيز من الحديد والمنغنيز في المحلول الذي سيوفر المعادن اللازمة لترسيب الحجارة الحديدية المخططة المذكورة سابقا. ودون الحصول على أشعة الشمس، سيقتصر البناء الضوئي على عدد قليل من المناطق الحرارية المائية القادرة على كسر الجليد كما تفعل الآن في أنتاركتيكا (القارة القطبية الجنوبية) Antarctica وأيسلندا Iceland؛ ويمكن لحياة البناء الضوئي أن تقوم هناك. وفي فصل قصير من سبع فقرات، في كتاب من 1400 صفحة نشر من قبل مشروع من جامعة كاليفورنيا في عام 1992 (أربع سنوات بعد كتابته)، رتب المؤلف المشارك جو كيرشفينك هذه البيانات للمرة الأولى، وأطلق عليها اسماً جديداً: أرض كرة الثلج. وفي الوقت ذاته، اتخذ خطوة إضافية بافتراض أنه ربما نتجت في أعقاب واحدة أو أكثر من حلقات أرض كرة الثلج من دهر الطلائع ظروفٌ بيئية من شأنها أن تقود إلى تطور سريع - ما نقبله اليوم بما يُسمّى الدافع التطوري للتشعب الإشعاعي Radiation لشعب الحيوانات.

إذن، فما الذي كان خطأً في النماذج المناخية، وكلها أعطى حلولاً توحي أنه بمجرد وجود هذا النوع من التجمد العالمي، لن تهرب الأرض أبداً من الجليد العالمي؟ كانت المشكلة في أنها لم تكن تُدرج الزيادة في ثاني أكسيد الكربون خلال الزمن الجليدي والتي من شأنها أن تزيد تدريجياً أثر الدفيئة. وقد لاحظ علماء المناخ، وخصوصاً جيمس ووكر James Walker وجيم كاستينغ Jim Kasting، قبل عشر سنوات أن ثاني أكسيد الكربون قد يسبب في نهاية المطاف هروباً من كارثة الجليد بسبب الضغط

المؤدي إلى ازدياد لطيف امتصاصها للأشعة تحت الحمراء. إلاّ أنّ اقتراحهما ذلك كان فقرة واحدة فقط في ورقة طويلة لم تُدرج في النماذج المناخية العالمية قط، ببساطة لأنه لم يتوقع أحد أن هذا قد حدث فعلاً!

وفي العقدين اللذين تليا نشر تلك الفكرة، دخل العديد من علماء الجيولوجيا وعلماء كيمياء الأرض وعلماء المناخ في نقاشات وأجروا اختبارات مكثفة على تلك الفرضية، موسعين المفهوم وموضحين توقعات النماذج Models. فقد قدم بول هوفمان Paul Hoffman وزملاؤه من جامعة هارفارد، على سبيل المثال، كمّاً كبيراً من البيانات حول النظائر المستقرة يُظهر أن ارتفاع تراكيز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي انتهى على الأرجح بتحوله إلى حجر جيري وكربونات خنقت الترسبات الجليدية. وكان علماء الزمن الجيولوجي، وباستخدامهم للتأريخ عالي الدقة باليورانيوم - الرصاص، قادرين على إظهار التزامن في انتهاء كلتا الفترتين الجليديتين الكبيرتين قرب خط الاستواء في فترة الطلائع الحديثة Neoproterozoic، وكان هذا تنبؤاً واضحاً للنمذجة.

نرى هنا، مرة أخرى، تفنيداً كبيراً لمبدأ الوتيرة الواحدة Uniformitarianism، فأرض كرة الثلج ستتسبب حتماً نقصاً شديداً في الإنتاج العضوي البحري لأن جليد البحر سيحجب أشعة الشمس. وتعاقب الأدوار الجليدية لكرة الثلج ونهاياتها بالدفيئة الفائقة لابد من أنه فرض مصفاة بيئية قاسية على تطور الحياة. ويوفر السجل الأحفوري لما قبل الإدياكاري Pre-Ediacaran fossil record أدلة قليلة، لكن تنوعاً من الأحافير المجهرية في البحر، تُعرف باسم الأكريتارك Acritarchs (عوالق بلانكتونية Planktonic organisms صغيرة الحجم، لكنها بالتأكيد من حقيقيات النوى)، تزايدت وتناقصت أعدادها بشكل دراماتيكي. ومن المعروف أن العديد من الكائنات الحية تستجيب للإجهاد البيئي Environmental stress من خلال إعادة تنظيم شمولية لجينوماتها. والمغزى التطوري والنمائي لمثل هذه التغيرات الجينومية هو موضوع ساخن للبحث في علم الأحياء الجزيئي Molecular Biology. وحقيقة أن الأحافير الإدياكارية المتنوعة ظهرت أولاً وحالاً عقب الدهور الجليدية لكرة الثلج تدعم فرضية "الزناد" الإيكولوجي Ecological "trigger" لهذا الظهور المفاجئ. إلاّ أنّ مقارنات التعاقب الجزيئية للكائنات الموجودة تدل على أن أطوار الحيوانات متعددة الخلايا الكبرى Metazoan clades تطورت قبل بعض أحداث كرة الثلج أو كلها، لكن مثل هذه «الساعات الجزيئية» Molecular clocks تفترض معدلات موحدة للتغير الجيني. فإذا سببت الصدمات المناخية المترافقة مع أحداث كرة

الثلج تسارعاً كبيراً في معدلات استبدال الجينات في معظم أسلاف سلالات الحيوانات متعددة الخلايا، عندها ربما تتوافق الأدلة الجزيئية والأحفورية.

إلاّ أنّ محيطا متجمدا هو مكان غير ملائم للكائنات الحية التي تقطن السطح، ولذا لم يكن حدث الأكسجة العظيم قد بدأ بعد، إلى أن وقع الحدث الذي من شأنه أن يسمح لهذا المحيط بالذوبان. وتمكنت البكتيريا الزرقاء من النجاة خلال أرض كرة الثلج هذه، وربما في ينابيع ساخنة موضعية. وكانت الأرض محظوظة بأن كانت قريبة بما يكفي من الشمس وامتلكت نشاطاً بركانياً كافياً لإطلاق غازات الدفيئة لتتمكن في نهاية المطاف من أن تفلت من حالة كرة الثلج، وإلا لكنّا ما زلنا متجمدين، ولم نحصل على محيطات سائلة حتى وقت ما في المستقبل عندما تتزايد حرارة شمسنا لتذيب الجليد أخيراً. ولو أنّ الأرض كانت أبعد قليلاً عن الشمس؛ لكان ثاني أكسيد الكربون قد تجمد في القطبين كجليد جاف حارماً الأرض من الإفلات من كرة الثلج وجاعلاً إياها كالمريخ. وقد تلقى حياة السطح حتفها تماماً.

كانت الأرض مع أكسجين غلافها الجوي الجديد مكاناً غريباً، على الأقل من حيث ما كان يحدث للحياة أو لا يحدث. ومن الواضح أن تطور التنفسِ الهوائي Aerobic respiration، وكيميائنا الحيوية التي تسمح لنا بتنفس الأكسجين، يمكن أن يكون قد حدث فقط بعد وجود الأكسجين. ولابد من أنه كانت هناك فجوة زمنية بين ظهور الأكسجين والكائنات الحية الأولى القادرة على تنفسه. وفي الواقع، فالتطور قد يفضل كثيراً أي كائن حي يستطيع استخدام الأكسجين، وذلك لأنه ما من جزيء آخر يجعل التفاعلات الكيميائية التي ندعوها الحياة تحدث بشكل أسرع وأدق من حالة استخدام الأكسجين، أو تحرر كمية من الطاقة تساوي تلك التي تتحرر عندما يُستخدم الأكسجين.

إنّ الفجوة الزمنية بين تطور إطلاق الأكسجين وظهور الكائنات الحية التي تستطيع تنفسه في الغلاف الحيوي قابلةٌ للتميز في السجل الحيوي الأرضي. فالبكتيريا الزرقاء التي وجدت نفسها فجأة في عالم لم يعد مغطىً بالجليد ستكون قد غزت بسرعة مياه السطح الجديدة والدافئة لكل محيط. ولأن كمية اليابسة من نحو 2.2 بليون سنة كانت أقل بكثير مما هي عليه حاليا، ولأن المحيط الكوكبي كانت لديه ملايين السنين ليحمل بالمغذيات الخام من النفاثات الحرارية المائية، فستكون البكتيريا الزرقاء قد تضاعفت إلى أرقام لا يمكن استيعابها، رافعة بسرعة كمية الأكسجين. وكانت ستطفو في النظام الإيكولوجي الشاسع الأفق، وفي الأعماق الضحلة حيث يمكن للضوء الوصول إليها، وحتى على ما كان

موجوداً من مساحة يابسة صغيرة. وبينما ستطلق هذه الكائنات الحية هذا الأكسجين الجزيئي بجنون، فستستنفد أيضاً بسرعة ثاني أكسيد الكربون الذي كان قد تراكم في الهواء خلال حدث أرض كرة الثلج الذي سببته هي بنفسها، فأنتجت في نهاية المطاف ثروة من الهيدروكربونات في بيئة المحيط. ومقابل كل جزيء من الأكسجين يطلقه البناء الضوئي، تُدرج ذرة كربون واحدة في مادة الحياة. وتؤكل اليوم الهيدروكربونات الخفيفة من هذا النوع من قبل الكائنات الحية التي تستنشق الأكسجين وتعيد تحويله ثانية إلى ثاني أكسيد الكربون. ولكنْ، لو أنّ الكائنات لم تكن قد طورت بعد القدرة على تنفس الأكسجين؛ لكان السؤال المطروح عن المكان الذي قد تذهب إليه هذه المادة العضوية الطافية كلها. وسيكون هنالك قدر كبير منها لدرجة إحداث تغيرات كبيرة في كيمياء سطح الأرض ومحيطاتها وهوائها.

عندما يُمزج النفط والأكسجين معاً في الهواء يشكلان مزيجاً متفجراً؛ وشرارة واحدة من البرق ستقود إلى انطلاق تفاعل لن يتوقف، لكنّ النفط المتبعثر في الماء كجسيمات صغيرة لا يمكن أن يتحلل إلا بفعل الميكروبات. ودون إعادة تدوير فعالة، وجب على الأرض العيش في اختلال كبير في توازن دورة الكربون، وخصوصاً أنّ كمية كبيرة من النفط ستنتج مع ضخ كمية مساوية من الأكسجين في الغلاف الجوي. ولدينا في هذا الوقت دليل على حدث الأكسدة الكبير عند 2.1 بليون سنة، والذي شكّل واحداً من الترسبات العالمية الأكبر لخام حديد الهيماتيت Fe_2O_3 النقي - منجم سيشين Sishen mine في جنوب إفريقيا.[15] لابد من أنّ الغلاف الجوي للأرض كان قد حُمِّل بشكل فائق بالأكسجين في ذلك الوقت، وإلى مستويات لم تُصادف منذ ذلك الحين، وربما من المستحيل الحصول عليها دون غلاف حيوي مُغاير يقودها إلى ذلك. ولو سارت كواكب تدور حول نجوم أخرى في العملية ذاتها، فإن الأكسجين عالي الضغط في غلافها الجوي سيلوّح بالعَلَم الطيفي ليعلن: «نحن هنا، وقد حللنا معضلة البناء الضوئي!»

والحقيقة هي أنّ سجل نظائر الكربون للفترة الزمنية بين 2 و2.2 بليون سنة مضت يقع بعيداً خارج التوازن الذي أعطاه علماء كيمياء الأرض اسمه الخاص، الاسم الذي يصعب لفظه «انحراف لوماغوندي جاتولي» Lomagundi-Jatuli Excursion، وهو الأكبر والأطول لحدث مماثل عُثر عليه حتى الآن في تاريخ كوكبنا كله. وقد تم التقاط معظم الكربون المنبعث من البراكين على شكل مادة عضوية مما أطلق الأكسجين إلى الهواء، أما الآن فهذه النسبة هي نحو عشرين في المئة فقط. وهذا هو الدليل على

وجود أرض مع أكسجين لكن دون كائنات حية قادرة على تنفسه: التقلبات الحادة في دورة الكربون والناتجة من إفراز البكتيريا الزرقاء كميات كبيرة من منتجات الكربون كفضلات لكن دون كائنات حية تستخدم هذه المركبات الكيميائية كغذاء. وفي الواقع، تبدو بقايا هذه الحمأة Sludge موجودة في مقاطعة كاريلا الروسية، كنوع غريب من الصخور يدعى شونغيت Shungite. واليوم، تتعرض معظم هذه المكونات الشبيهة بالنفط للتحلل الحيوي Biodegradation من قبل الكائنات الحية المجهرية التي تتنفس الأكسجين، وهو ما يشبه مصير معظم النفط المتسرب في خليج المكسيك. وهذا دليل مباشر على أن البيئة غصّت بالهيدروكربونات، بدلاً من إعادة تدويرها مباشرة. ونتيجة لذلك، استمرّ محتوى الأكسجين بالارتفاع حتى أصبح متوفراً بشدة لدرجة أنتج غلافاً جوياً فائق الإشباع بالأكسجين الموجود بضغوط أعلى بكثير مما هي عليه اليوم. ولو وجدت أي غابات؛ لتسببت أول شرارة من البرق بحريق غابات عالمي بحرارة ونطاق أوسع من أي شيء قد حدث على الأرض في زمن الغابات.

انتهت هذه الحلقة الغريبة من تاريخ الحياة فجأة عندما أنتج التطور أولى الكائنات الحية التي تستطيع تنفس الأكسجين بكفاءة. وقد تطورت إنزيمات خاصة معتمدة على النحاس Copper لتقوم بذلك، لكن ترسبات النحاس بحد ذاتها تحتاج إلى بيئات غنية بالأكسجين لتتشكل. وبزغ إلى الوجود جسيم خلوي من نوع جديد كلياً، وهو لا يزال موجوداً، إنه العضية المدعوّة بالميتوكُندريا (المتقدرة) Mitochondria، المصدر الأكبر للطاقة في الخلايا حقيقيات النوى والتي هي خلايا أكبر من سلائفها بدائيات النوى (البكتيرية)، فضلاً عن كونها تضم "غرفاً" داخلية مغلفة بجدران في تلك الخلايا العملاقة (مقارنة بكل ما جاء قبلها). والميتوكُندريا قطعتها الخاصة الصغيرة من الحمض النووي DNA، والتي تخلفت هناك من زمن كانت فيه مجرد بكتيريا حية حرة، ذلك الميكروب الذي تعلم تنفس الأكسجين بكفاءة. ونتيجة لذلك استُعبِد لبليونين من السنين الماضية.

من المثير للاهتمام أن نلاحظ أن التقدير الأفضل لعمر أحدث سلف مشترك Luca لجميع حقيقيات النوى هو 1.9 بليون سنة، وهذا ربما يكون العلامة الواسمة للوقت الذي تطورت فيه أخيراً حقيقيات النوى لتعيد التوازن إلى دورة الكربون العالمية. وعلى ما يبدو، فقد تطلّب الغلاف الحيوي 200 مليون سنة من التطور ليأتي باستجابة كافية لوجود الأكسجين السام بجوهره.

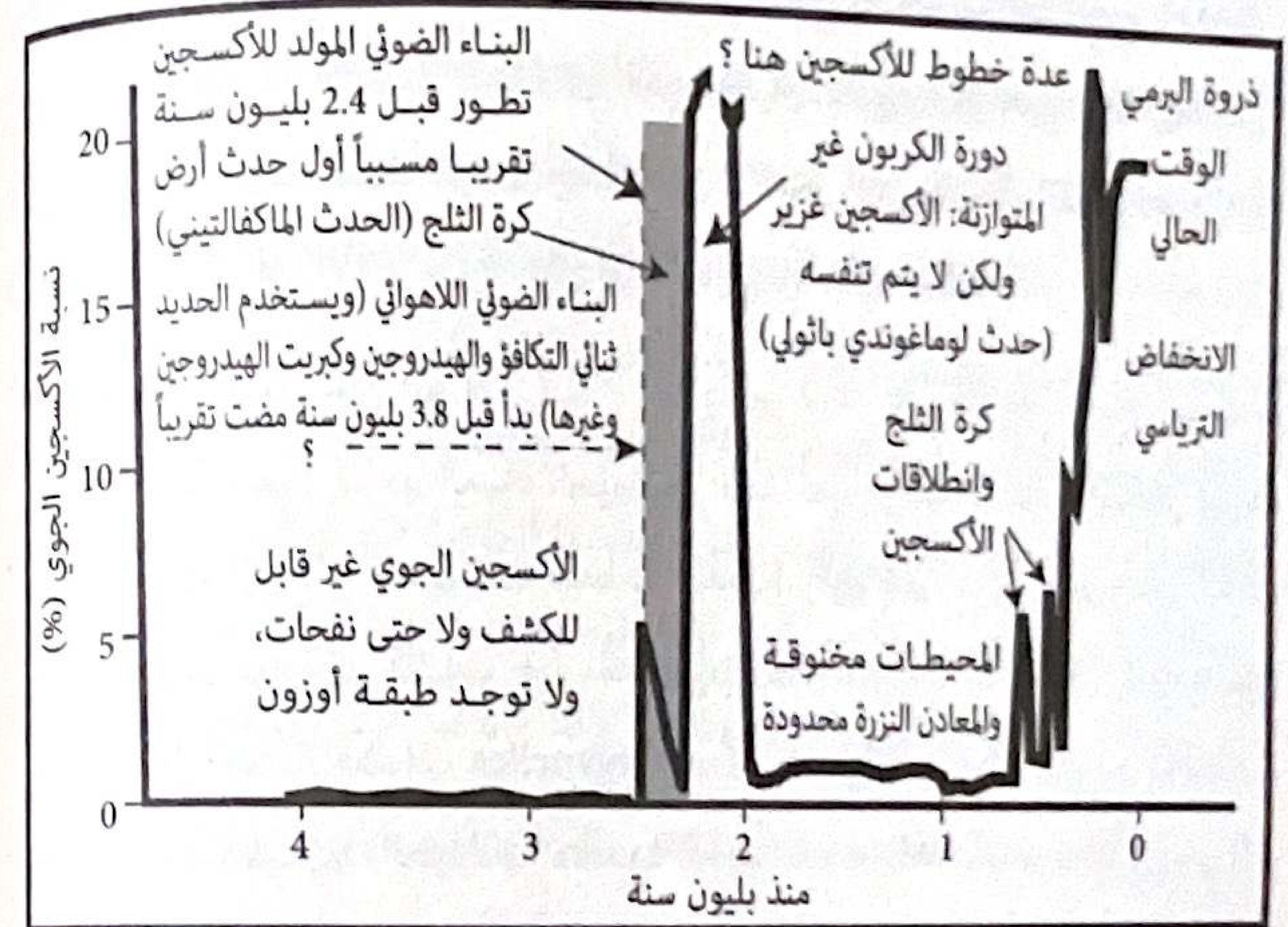
6

الدرب الطويل إلى الحيوانات: ما بين 1.0-2.0 بليون سنة مضت

دُعي الوقت الممتد بين حدث الأكسجة العظيم (الذي بلغ ذروته قبل نحو 2.3 بليون سنة) وبين أولِ ظهور للحياة الشائعة متعددة الخلايا بالبليون الممل. وسببُ تلك التسمية هو (كما يفترض) عدمُ حدوث تغيُّر بيولوجيّ كبير فِعليّ، ويبدو كما لو أنّ تاريخ الحياة قد أخذ غفوةً. ويُعدُّ بليون سنة وقتاً طويلاً بالنسبة إلى عدم حدوث شيء تقريباً، ولكنْ، ومثل أشياء أخرى كثيرة، تبيّنَ مؤخراً أنّ هذا البليونَ ليس مملاً إلى تلك الدرجة. وتُظهر لنا الاكتشافات الجديدة أنّ الحياة لم تأخذ قسطا من الراحة، وفي الوقت نفسه فلا توجد حيوانات عمرها بليون سنة على الرغم من الاقتراحات المتكررة بعكس ذلك. بل يبدأ هذا المدى الطويل من الوجود مع أول ظهور مهمّ للأكسجين في الغلاف الجوي، ومنذ بليوني سنة حدثت ثورة كبرى في الحياة، وهي الشيوع الواسع لحياة حقيقية النوى، أي خلايا كبيرة ذات نواة، وهو شكل الحياة الخاص بنا. وبينما كان التنوع الأكبر بين الكائنات الجديدة في هذه الفترة الزمنية للأوالي، وهي نعرفها من الطلائعيات (الأوالي) Protozoa المألوفة بالنسبة إلينا مثل الأميبا والباراميسيوم واليوغلينا وأمثالها التي لا تزال تعيش في يومنا هذا، ظهرت أيضاً بعض الأحافير الغريبة الأكبر حجماً، ومن بينها واحدةٌ من الأحافير الأكثر غرابة على الإطلاق بين الأحافير المكتشفة.

ويتفق الخبراء على أنه قبل 2.2 - 1.0 بليون سنة، على الأرجح، لم يكن يوجد ما يكفي من الأكسجين لدعم الحياة الحيوانية.[1] (هذا هو الوقت المناسب لنلخّص بسرعة الفرق بين الميتازوا (أي الحيوانات متعددة الخلايا) والطلائعيات. إنّ المجموعات الثلاث هي حقيقيات نوى، أي كائنات حية (متعضيات) Organisms ذات خلايا كبيرة تحتوي على نواة إلى جانب عُضيات Organelles أصغر كالميتوكندريا. ولا فرق بين الحيوانات والطلائعيات والميتازوا (الحيوانات متعددة الخلايا) Metazoa، فكلتاهما تتكون من أكثر من خلية مفردة في كل مرحلة من مراحل حياتها إلا عند الإخصاب. أما الطلائعيات؛ فيمكن أن تشبه الحيوانات من حيث إن العديد منها قادر على الحركة وذو سلوك معقّد نسبياً، لكنها تتألف جميعاً من خلية واحدة فقط، ومع ذلك فهي أكبر بكثير وأكثر تعقيداً من البكتيريا إذا كان قد اتُّفِق على ذلك، إلا أنه لم يُتّفق على السبب بعد. فقد

كانت الكائنات الحية قادرةً على القيام بالبناء الضوئي الأكسجيني، لكن كان ينبغي أن تكون هناك حياة أكثر بكثير مما تشير إليه جميع البينات. وتحتاج الحيوانات إلى نسبة جيدة من الأكسجين تشكّل عشرة في المئة من الغلاف الجوي (ونحن اليوم عند نسبة 21 في المئة) ولم تكن كائنات البناء الضوئي تؤدي عملها كما يجب. وعندما جاء الجواب أخيراً، كان مرةً أخرى عبارة عن العنصر الذي يتخلّل صفحات هذا التاريخ في نموذج متكرر أبداً: الكبريت، وعادة في شكله الأكثر سمية والواهب للحياة في الوقت نفسه، أي كبريتيد الهيدروجين H_2S، جزيء الحياة والموت. وفي عام 2009 نُشرت مقالة في مجلة وقائع الأكاديمية الوطنية للعلوم *Proceedings of the National Academy of Sciences* بيّن فيه عالِمُ البيولوجيا القديمة من جامعة هارفارد آندي نول Andy Knoll وزملاؤه أنّ تراكيزَ الأكسجين كان ينبغي أن تكون أعلى خلال البليون سنة المُملّة، لكنها لم تكن كذلك. شيءٌ ما كان يمنعها من الارتفاع، والفترة الزمنية الطويلة الخالية من أي نوع من مراحل وسط حقيقية ما بين الكائنات الحية وحيدة الخلية منذ حدث الأكسجة العظيم قبل 2.3 بليون سنة وبين ظهور الكائنات متعددة الخلايا الأكبر في وقت لاحق بعيد جداً، كانت كذلك بالفعل.



نموذجنا الجديد الخاص بارتفاع تركيز الأكسجين الجوي وبعض الأحداث المتعلقة به.

في تلك الفترة الزمنية الطويلة لم توجد أشكالُ الحياة من التي يمكن أن نصفها بأنها معقدة (مع أننا نأمل بأن يكون قد اتضح من الفصول السابقة أنه حتى أبسط

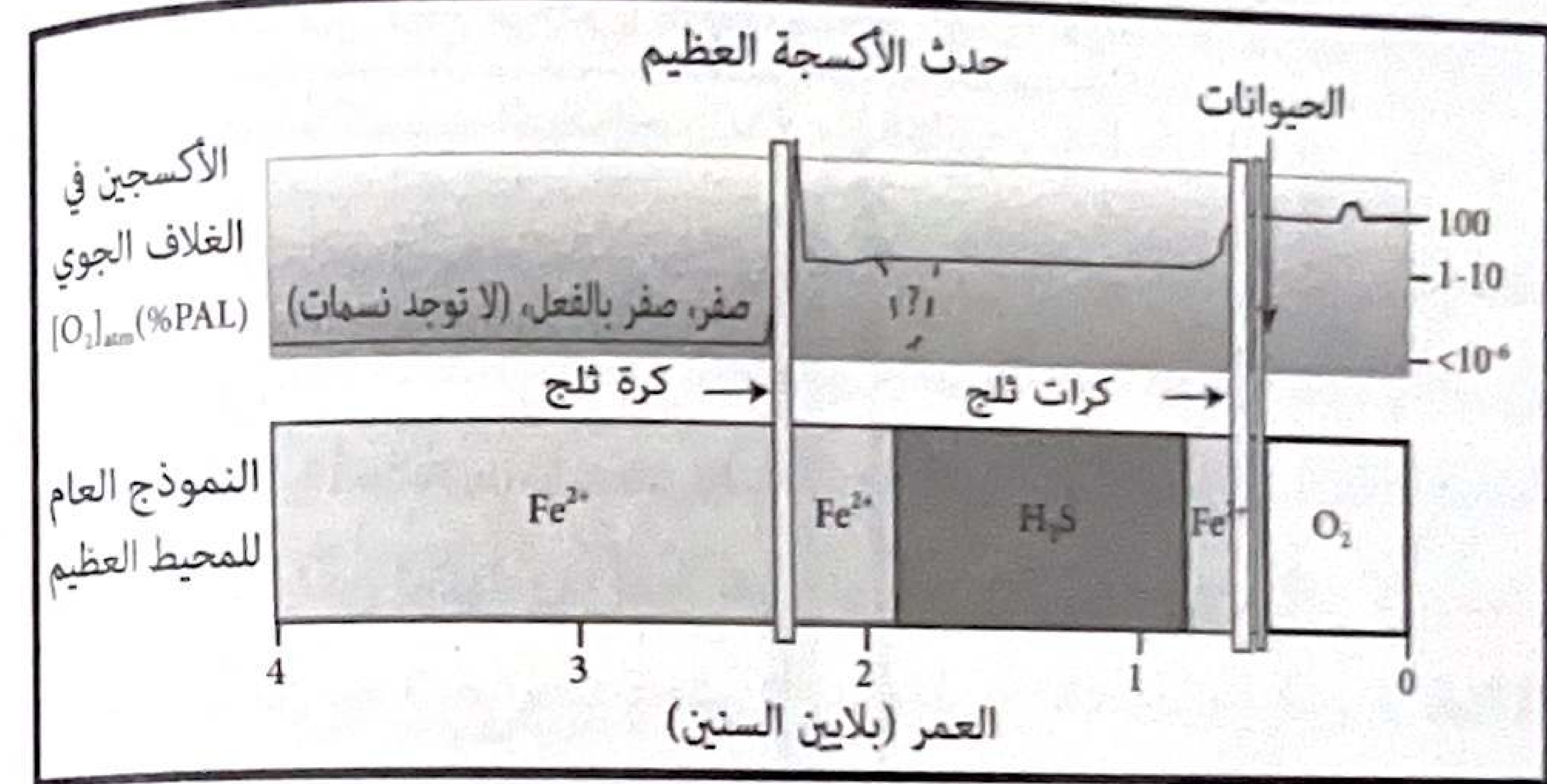
أشكال الحياة على الأرض معقدة على نحو لا يصدَّق وذلك عند ملاحظتها على المقاييس الجزيئي والكيميائي!). والسبب هو وجود وفرة مفرطة من البكتيريا وحيدة الخلية المُستهلِكة للكبريت تتنافس مع أشكال الحياة المُطلِقة للأكسجين. وهكذا تنافس اثنان من أشكال الحياة شديدي الاختلاف على الموارد التي ترغب فيها كل الأحياء: الفضاء، والمغذيات. إنّ الميكروبات المتطلبة للكبريت التي تدعى بالبكتيريا الخضراء والأرجوانية الكبريتية، لا تزال تعيش اليوم، لكنها تعيش فقط في أكثر المناطق سمية، في بحيرات المياه الضحلة وبعض الممرات البحرية الخالية من الأكسجين، غير أنها سطحية بما يكفي لتنفذ أشعة الشمس عبرها وتصل إلى مستوى البكتيريا لتتمكن من القيام بالبناء الضوئي. لكن المشكلة في هذا النوع من البناء الضوئي أنه لا يشطر جزيء الماء، ومن ثمَّ لا نحصل على الأكسجين كمنتج ثانوي.

يبدو أنّ الحياة كانت كسولةً في الأساس. وشطر جزيء الماء هو مهمة صعبة في الواقع وتؤدي إلى توليد شتى أنواع المركبات السامة الكريهة. واستخدامُ كبريتيد الهيدروجين بدلاً من الماء للقيام بالبناء الضوئي ينتجُ منه مركبات كبريتية أقل سمية، حتى إنّ العديد من أنواع البكتيريا الزرقاء ستغلق آلياتها المُولِّدة للأكسجين، لو أُتيح لها الخيار، وتستخدمُ كبريتيد الهيدروجين بدلاً من الماء.

وكانت المحيطات متراصفة في طبقات عبر الجزء الأكبر من البليون المُمِّل، مع طبقة عليا رقيقة من المياه السطحية الغنية بالأكسجين والنظيفة حيث تعيش الطحالبُ الخضراء وحيدة الخلية، وتأخذ أشعة الشمس وتستخدم طاقتها للنمو الخلوي مطلِقةً الأكسجين طوال الوقت. ولكنْ تحتها، ربما فقط بعشر أو عشرين قدماً للأسفل، كانت تقع طبقةٌ مختلفة كلياً من ماء البحر ممتدة حتى قاع المحيط. وكانت أرجوانيةَ اللون في طبقاتها الأعلى الأكثر ضحالة، مكتسبة لونها من أعداد لا تُحصى من الميكروبات الأرجوانية الكبريتية. وكانت المياهُ التي عاشت فيها تلك الميكروبات السمَّ القاتلَ لمعظم أشكال الحياة في المحيطات في عالمنا لأنها مشبعة بكبريتيد الهيدروجين السام، وقد تخمَّرت كلُّها في مستنقع نتن من الكبريت المصهور المقترب من درجة الغليان. وحتى في موتها كانت تلك الميكروبات تساهم في سلب الأكسجين من العالم (دون وعي بالطبع، مع أن بعض المتخصصين بالميكروبات يَبدون مقتنعين بأنّها لطالما كانت كائنات ذكية ذكاءً لئيماً نوعاً ما). فبعد الموت تغرق أجسامها الدقيقة إلى القاع، أو حتى تبقى في مكانها إذا كان الماء مالحاً أو مشبعاً بالرواسب بما يكفي، وعندما تتعفن تستهلك المزيد من

القليل من جزيئات الأكسجين النفيسة التي أنتجتها الطبقة الرقيقة من الميكروبات المنتِجة للأكسجين في الطبقة السطحية فوقها. وتُستخدم جزيئات الأكسجين النفيسة في تعفُّن الشيطان الأرجواني بدلاً من أن تصل إلى الغلاف الجوي والمحيطات الصافية.

وعلى الرغم من ندرته على الأرض في عصرنا، فإنَّ نظام الطبقات هذا لا يزال موجوداً في بضعة مواقع. ومن أكثرها شهرة ما يسمى بحيرات قنديل البحر في جزيرة الميكرونيزيافي بالاو Palau في الميكرونيزيا. وهنا تمتلئ بحيرات الماء العذب الكبيرة بأعداد وفيرة من قناديل البحر الهائلة التي تسبح برشاقة في المياه الزبرجدية الغنية بالأكسجين. وبعد بضع عشرات الأقدام تحت هذه العدسة البلورية من المياه النظيفة المفعمة بالحياة الأكسجينية تقبعُ طبقةٌ ثانية أعمق مظلمة وكريهة إلى أبعد الحدود بالنسبة إلينا نحن كائنات الأكسجين والضوء، فالأكسجين فيها قليل أو معدوم لكنها مشبعة بكبريتيد الهيدروجين. وهي ذات لون أرجواني داكن لوجود أعداد لا تحصى من البكتيريا الأرجوانية الكبريتية نفسها التي أبقت العالَم مكاناً غير مأمون وغير متاح أمام أيِّ شيء يحتاج إلى وفرة من الأكسجين، ولم يكن ذلك مملاً على الإطلاق بالنسبة إليها.



نموذجنا المنقَّح للأكسجين في الجو والبحار

(الاختصارات: O2: الأكسجين؛ Fe^{2+}: شوارد الحديد ثنائية التكافؤ؛ H_2S: كبريتيد الهيدروجين؛ GOE: حدث الأكسجة العظيم؛ PAL% = مستوى النشاط الفيزيائي).

وأخيراً منذ نحو 600 مليون سنة عندما ارتفع تركيز الأكسجين أخيراً إلى تراكيز أعلى، أُرسِلت البكتيريا الكبريتية الأرجوانية ومتطلَّبات عالمها إلى الحجرات الخلفية الرطبة والسامة من عالمنا، لكنّها لطالما كانت موجودةً ومستعدة دائماً لاستعادة العالم الذي خسرَته. ويمكن اعتبارها إمبراطوريةَ الشرّ. وفي العصور الديفوني والبرمي والترياسي والجوراسي والطباشيري الأوسط ردت هذه الإمبراطورية بضربات انتقامية، كما سنرى في الفصول اللاحقة.

وفي نهاية المطاف تغيَّر ميزان القوى بين كائنات البناء الضوئي الكبريتي وبين الكائنات المنتجة للأكسجين وذلك لصالح الأكسجين، وربما نجم ذلك عن الزيادة التدريجية في مساحة القارات المعرَّضة للهواء. إنَّ الحديد المتفتت من القارات بفعل التعرية والمنجرف إلى المحيطات كان يتفاعل بسرعة مع الكبريت؛ فيرسبه على شكل كتلة صلبة ثقيلة غارقة من البيريت؛ فيخرجه من النظام. فهذه الخسارة من شأنها أنْ تُجوِّع البكتيريا الكبريتية للعنصر الوحيد الذي لا تستطيع الاستغناء عنه. وإضافة إلى ذلك، فإنَّ التجوية والتعرية القارية تولِّدان المعادن الطينية Clay mineral التي ترتبط بقوة بالجزيئات العضوية وتدفنها في الرواسب. فإذا دُفنت ذرَّةٌ من الكربون العضوي قبل أن تؤكل لسبب ما، فإنَّ جزيءَ الأكسجين الذي نتج عند تكوُّنها يظل في البيئة رافعاً تراكيز الأكسجين وخافضا تركيز كبريتيد الهيدروجين. وحفَّزت حادثتا أرض كرة الثلج هذه العملية، إذ يبدو أن كلتيهما سببت قفزة في تراكيز الأكسجين بفعل ازدهار الطحالب التالي لأرض كرة الثلج، إذ وصلت البيئة إلى نقطة تحوّل من نوع ما. وبعد الحدث الأخير، منذ 635 مليون سنة، ظهرت الآثار الأولى للحيوانات الكبيرة، ولم يستغرق تطورها وقتاً طويلاً بعد ذلك، حالما نُفي الجحيم عن الأرض.

الكائنات الأولى متعددة الخلايا العجيبة

تألفت معظم أشكال الحياة في البليون الذي لم يعد الآن مملاً جداً من أبطال ركض الماراثون الذين استمرت حياتهم على الأرض أطول من غيرهم، وكان العرَض الأطولَ على الإطلاق وهو الستروماتوليت. وكانت الميكروبات لا تزال مهيمنةً، مثلما كانت منذ أول ظهور لها على الأرض. ولكن منذ نحو 2.2 بليون سنة ظهر شكل جديد غريب من أشكال الحياة، يبدو كلولب أسود رقيق لكنه بالتأكيد ليس مجهرياً، اسمه غريبانيا *Grypania* ويوضح مظهره أنَّ الحياة أحرزت تقدماً مهما: القدرة على العيش كمستعمَرات Colonies خلوية متماسكة مع بعضها وترتبط بواسطة أغشية، وكانت تلك أولى الكائنات الحية مُتعدِّدة الخلايا.

عُرِفت غريبانيا منذ وقت طويل، لكنَّ سلسلةً غريبة من الأحافير التي عُثر عليها في الغابون بإفريقيا في عام 2010 غيرت نظرتنا للأمور.[3] فبينما قد تكون غريبانيا مستعمَرةً من بدائيات النوى Prokavyotes (وفي هذه الحالة بكتيريا على الأرجح) تبدو الأحافيرُ الجديدة، التي لا تزال دون اسم، كبيرةً جداً ومعقَّدة جداً. ومهما كانت ماهيتها، فنحن نعلم ما ليست عليه، فهي لم تكن الحيوانات الأولى بالتأكيد.

إنَّ الحيوانات الحقيقيةَ الأولى أصغرُ سناً بكثيرٍ من الغريبانيا وأمثالها. فالحيوانات عمرها أقل من بليون سنة، وعلى الرغم من أنَّ العمر الدقيق للحيوانات الأولى يتراجع باستمرار نظرا لوقوعها في صخور أقدم عمراً، بناء على وسائل أكثر تطوراً للكشف عن وجودها، فلا توجد أي أدلة أحفورية معروفة على حيوانات عمرها أكبر بكثير من حدث كرة الثلج الأخير. وفي كل الأحوال، فهذا جدال حول مقاطع صغيرة من الوقت مقارنةً بالفترة الزمنية الكبيرة للحياة على هذا الكوكب. ويوجد بالطبع العديد من أنماط الكائنات الحية مُتعدِّدة الخلايا، بما في ذلك تنوُّعٌ كبير لأشكال بدائيات النوى. ومما لا شك فيه أن الاختراع التطوري للحياة بأكثر من خلية واحدة يعود إلى أكثر من بليوني سنة، لكنَّ معظم بدائيات النوى متعددة الخلايا تتألف من نمطين فقط من الخلايا، وهكذا فلا يمكن أن يخطئ أحد فيعتقد أنها من الحيوانات.

العفن الغروي الخلوي Slime molds هو مُتعدِّد خلايا وكذلك بعض البكتيريا الزرقاء ومجموعة واحدة من البكتيريا المنجذبة مغناطيسياً. ومع ذلك، وبطريقة ما، فإنَّ تلك طرق تطوريةٌ مسدودةٌ (بالطبع ما لم تكن أنت عفناً غروياً؛ لكن لم تنبثق عن هذه المجموعة في نهاية المطاف إلا أعفان غروية أخرى). وقد وُجدت على الأرض منذ أكثر من عدة بلايين من السنين، وهي محافظة جدا فيما يتعلق بالتطور. أما النباتات متعددة الخلايا التي ظهرت منذ أكثر من بليون سنة فهي أكثر تعقيداً، وعلى الأرجح كانت أنواعها تشبه إلى حدٍّ بعيد الطحالبَ الخضراء والحمراء التي توجد على أيِّ شاطئ بحريّ في المناطق بين المد والجزر وصولاً إلى المستويات التي يمكن أن ينفذ إليها الضوء. ومع ذلك تبقى الحيوانات أصغر سناً منها.

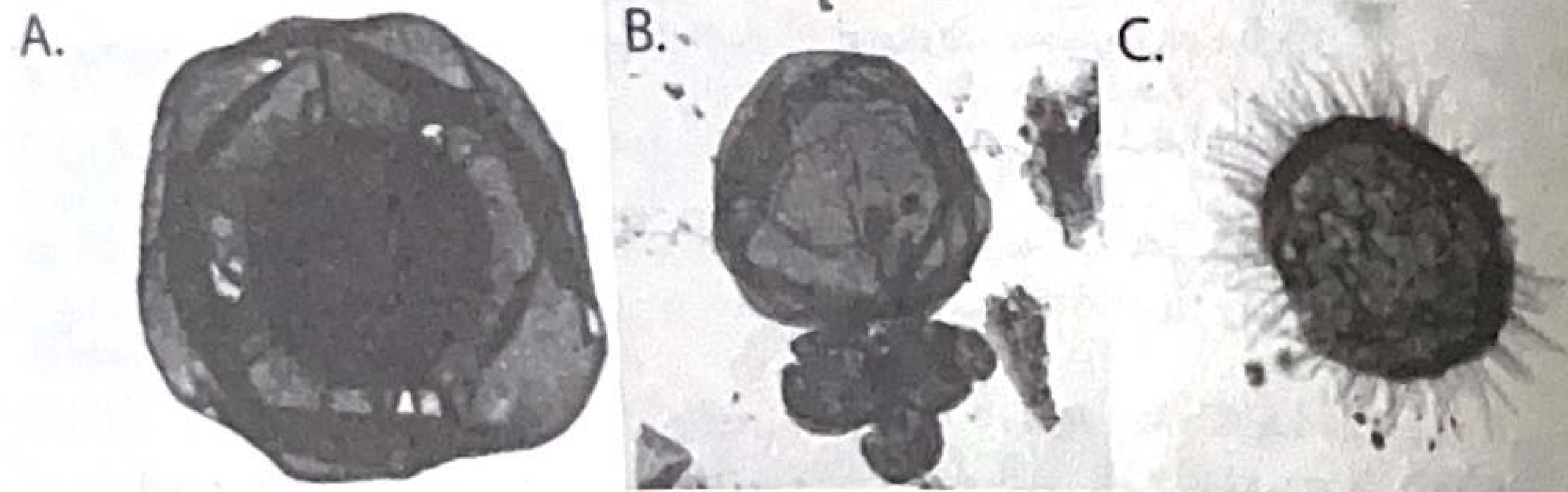
ويبدو أن لحجم الكائنات الحية علاقة بظهور الأكسجين في الغلاف الجوي. فقد سمح الأكسجين بالوصول إلى حجم أكبر مقارنة بالأوقات السابقة له، والتكيّفات البيولوجية Biological adaptation التي زادت من سرعة و/أو حجم الاستحواذ على الأكسجين غالباً ما نتجت منها العملقة.[4] وسنقدمُ مثالاً أفضل على ذلك في فصل لاحق يوضح الكيفية التي كان بها تصميمٌ جديد ذو كفاءة عالية للرئة والجهاز التنفسي قد سببَ عملقة الديناصورات.

وظهرت أحافير الحيوانات الحقيقية لأول مرة بوفرة منذ نحو 600 مليون سنة. ويُظهر السجلُ الصخريُّ قرابة ذلك الوقت الدليل الأول على "الأحافير الآثارية"، فسِجلّات التغذي أو مسارات الحيوانات القديمة بقيت محفوظة في الترسبات ليس

على شكل أجسامها المتحجرة وإنما كأحافير النشاط Activity record- سِجِلُ السلوك القديم. وفي ذلك الوقت كانت تراكيز الأكسجين تقترب مما هي عليه اليوم (لكنها لم تبلغه)، بلغت تراكيز الأكسجين الحُرُّ مستويات مرتفعة نسبياً، وكذلك تراكيز الأوزون، وهكذا حُجِب قسم كبير من الأشعة فوق البنفسجية القاسية وغيرها من الإشعاعات التي كانت تصل إلى سطح الأرض في الأوقات السابقة.



عالم الجيوبيولوجيا من جامعة هارفارد، آندي نول، في يوم مشمس على غير العادة على صخور تعود إلى حقبة الطلائع الحديثة متكشفة في شرق غرينلاند. (حقوق الصورة بإذن من، آندي نول)



التبدلات في شكل الأكريتارك، وهي أحافير مجهرية مبهمة كانت تتألف من عدة أشكال متميزة من الكائنات الحية البحرية الصغيرة الطافية. لاحظ التغير بدءاً من حقبة الطلائع (A)، من ملساء المظهر إلى الأشكال المشوّكة بشدة في حقبة الطلائع الحديثة (B) والكامبري (C).

الكائنات الحية المثيرة المعروفة بالأكريتارك

في أي مناقشة تتعلق بالحياة ما قبل الكامبري تحظى الكائنات الحية المعروفة بالأكريتارك (غامضات الأصل) Acritarchs بجزء لا بأس به من الحديث. فقد ظهرت على الأرض في وقت مبكر: ويبدو أن بعضاً من أقدمها ظهر قبل نحو 3.2 بليون سنة، وبعد ذلك يستمر وجودها إلى زمن الحيوانات. ومع ذلك، فإنَّ حقيقة كونها طبقة تصنيفية (أصنوفة) Taxon أقرب ما تكون إلى «سلة القمامة»، بمعنى أن هذا الاسم الجامع يضم أيَّ عدد ليس فقط من الأنواع المختلفة فحسب بل أيضاً من الممالك والنطاقات المختلفة للكائنات حية، هي مجرد واحد من المؤشرات إلى قلّة معرفتنا بتاريخ الحياة قبل أن تصبح الأحافير شائعة في وقت الحيوانات والنباتات العليا.

وعلى الرغم من أنها تندرج ضمن أقدم الأحافير متعددة الخلايا المعروفة، والتي ظهرت لأول مرة في الفترة الزمنية لم يُسبر غورها منذ بليوني سنة، إلاّ أنها بقيت نادرة نسبياً. ولكن في منتصف دهر الطلائع، أو منذ نحو بليون سنة، أخذت تزداد من حيث التنوع والحجم والوفرة والتعقيد المورفولوجي في الشكل. وكانت زيادة التعقيد تتضح عموماً بزيادة عدد الأشواك الممتدة من أجسامها الكروية الصغيرة. وبقيت شائعةً منذ بليون سنة وحتى 850 مليون سنة، وبعد ذلك بدأ العصر الكريوجيني Cryogenian بتغيراته العالمية الهائلة التي أعطت تلك الفترة الزمنية اسمها، حيث يبدأ الاسم بالكلمة اليونانية "Cryo" المُحِقَّة تماماً وتعني التجمّد العظيم. وكانت نتيجةُ أحداث أرض كرة الثلج في دهر الطلائع انقراضاً جماعياً كبيراً في المحيطات وربما على اليابسة أيضاً. إذ انهارت مجموعات الكائنات الحية خلال أحداث أرض كرة الثلج - عندما كان سطح الأرض بكامله أو أغلبه مغطى بالجليد أو الثلج - لكنها تكاثرت في الانفجار الكامبري وبلغت أقصى تنوع لها في الباليوزويك (الحقبة الأولية) Paleozoic.

ومن المسلم به أنّ أياً من علماء الأحافير الشباب الطموحين ينجذبون أول الأمر إلى الديناصورات أكثر من أي من الأحافير الأخرى. ولما كان علماء الأحافير المحترفون يبدؤون دائماً كأطفال مهووسين بالأحافير، ففي الواقع، فإنَّ مجموعات الأحافير التي يُفترض أنها أقل إثارة هي أقل جذباً للاهتمام، حتى بين أولئك منهم الذين تحولوا فعلاً إلى محترفين. والعلماء الشباب الراغبون في دراسة الأحافير المجهرية قليلون حقاً. ومع ذلك، فإن بعضاً من أهم الأسئلة العلمية قاطبة قد نجدُ إجابتها

في دراسة هذه الأحافير. وهذا هي الحال مع الأسئلة الأعقد حول تاريخ الحياة؛ فالأكريتارك والأحافير المجهرية الأخرى التي عاشت قبل بليون سنة تحوي معلومات غنية بالنسبة إلى الإجابة عن الأسئلة، والتي قدمت لنا في الآونة الأخيرة فقط رؤى جديدة كاملة حول فترة زمنية بدأت منذ بليون سنة وكانت، في الواقع، مهمة جدا في تاريخ الحياة.

قبل بليوني إلى بليون سنة كانت الأحافير المجهرية للأرض بسيطة وامتدت مطولاً عبر السجل الأحفوري. ولابد أنها قد تشكّلت من كل من بدائيات النوى وحقيقيات النوى الصغيرة (مقارنة بحقيقيات النوى في الوقت اللاحق) من الأصناف وحيدة الخلية، البروتوزوا Protozoa التي لا تزال حية. ولكنّ شيئاً غريباً حدث منذ نحو بليون سنة، إذ بدأت الأحافير المجهرية غير المزخرفة سابقاً باكتساب الزخارف.

قد تكون هناك أسباب متعددة لصفة الفقارية Spinosity المتزايدة لدى الآركيتاركات، التي بدأت من نحو بليون سنة مضت ولكنها استمرت حتى العصر الكامبري. أولا، قد يزيد العمود الفقري على جسم كروي صغير مساحة السطح بالنسبة إلى علاقات الحجم، ومن ثمَّ تبطِئ وتيرة استقرار تلك الأجسام الكروية الصغيرة في مياه المحيط. وتستخدم العديد من الأجناس البلانكتونية الممتدة اليوم طريقة البقاء عاليا على سطح عمود الماء بدلا من الانغمار في القاع وتضمن بقاءها مدفونة تحت ركام ثلجي ثابت من الرواسب التي تميز قيعان المحيطات. ولكن الاستخدام الثاني للعمود الفقري كان كأداة دفاع ضد المفترسات. وربما بدأت المحيطات قبل بليون سنة بإيواء عدد كبير غير مسبوق من آكلات اللحوم (أو الآكريتاركات، التي قد تعتبر فنيا من آكلات العشب). وعلى أي حال، المأكول مأكول، أيا كان الآكِلُ. غير أن عمل نول Knoll الجديد مع فريقه يبين الآن بأن المستحاثات الفقارية المجهرية صارت أكثر تنوعا ووفرة قريبا من نهاية آخر انهيار جليدي على الأرض، قبل نحو 635 مليون سنة، وقتما كان التطور ماض في مساره. وفي الفصل القادم سأنظر كيف أن فهم ما يمكن تسميته الثورة الإدياكارية اتضحت معالمها بفضل ما سُجل عن المستحاثات الفقارية المجهرية، كذلك بواسطة اختفائها. وسنعود إلى قصة تلك المستحاثات الفقارية المجهرية في الفصل التالي.

نهاية البليون الممل

ها هو مشهدٌ لقاع البحر السطحي قبل نحو بليون سنة: النباتات الشبيهة بأعشاب البحر Kelp والطحالب الخضراء Green Algae تتموج في التيارات، وكذلك حُصُرٌ متلألئةٌ بألوان قوس قزح من الميكروبات مشكّلةً غلالات متعددة الألوان رقيقة كالشيفون الرقيق تغطي جميع الأجزاء المشمسة من القاع.[5] والستروماتوليت تخترق هذه الغلالات في القاع على شكل قباب كبيرة وصغيرة وتلال ضاربةً نحو الأعلى خارج غلالات الميكروبات. والمياه ثرية بأشكال الحياة وحيدة الخلية ومتعددة الخلايا، وليست هناك حيوانات في أيِّ مكان على الكوكب. ولكنَّ الساعة الجينية والجوية تدقّان تنازلياً نحو كارثة وتُشكُّل حاضنة جليدية.

قبل بليون سنة كانت الثورة تختمر في المحيطات، أما على اليابسة فربما كان هناك بالفعل كتلة حيوية كبيرة: فالميكروبات متعددة الحيل بالفعل كانت قد غزت البرك والمستنقعات في البداية لكنها في نهاية المطاف غطت الأراضي الرطبة والسبخات، وأيّ مكان كان معرَّضاً للشمس، وفيه ولو القليل من الماء، وربما كان يصل إليها أيضاً الغبار الذي تثيره الرياح مع كمية كافية من الفوسفات والنترات التي تمكّن هذه الميكروبات الدقيقة وحيدة الخلية الشبيهة بالنبات من النمو لتشكّل طبقةً مخاطية خضراء تغطي اليابسة. وقد استعمرت تلك الحياةُ اليابسةَ بوفرة، وبهذا كادت تمحو نفسها من الأرض في نهاية المطاف.

7

العصر الكريوجيني وتطور الحيوانات:
ما بين 850-635 مليون سنة مضت

المدينة الأسترالية أديليد Adelaide هي سر محفوظ، معزولة في تلك القارة الجزيرة عن بقية العالم، بل معزولة عن باقي أستراليا. فقد طورت هذه المدينة الساحلية ثقافتها الخاصة - الفنية والعلمية. وقد تأثرت سمعتها العلمية بقوة باكتشاف هائل في علم الأحافير، وقع فور نهاية الحرب العالمية الثانية - الاكتشاف في التلال الداخلية القاحلة من أديليد لأقدم الأحافير المعترف بها للحيوانات الكبيرة الإدياكاريات Ediacarans. وتحتفي أديليد بهذا السجل الأحفوري بالعديد من الطرق، بما في ذلك تسمية الأبنية والمعاهد باسم اثنين من عمالقة العلم اكتشفا تاريخ الحياة خلال الفترة زمنية تمتد ما بين بليون و600 مليون سنة مضت. دوغلاس موسن Douglas Mawson، الأسترالي الجَسور الذي نجا من بعثات القطب الجنوبي المروعة وساحات القتال المميتة في الحرب العالمية الأولى بفرنسا، والرجل الذي اكتشف أيضاً براهين على الدور الجليدي في أواخر ما قبل الكامبري في أستراليا، وكان المفهوم مشكوكاً فيه جدا في ذلك الوقت، وريجينالد سبريغ Reginald Sprigg الذي اكتشف تلك الأحافير،[1] كما سنسرد فيما يلي، وتبعه، مثل موسن، أستاذ جيولوجيا آخر من جامعة أديليد حيث يعيش ويعمل اليوم المؤلف المشارك وورد، وهو مارتن غلاسنر Martin Glaessner.[2] وقد حافظت الأجيال الجديدة من الباحثين على هذا التقليد في دراسة نشأة الحياة الحيوانية، وواحد من أهم ممثلي هذا الجيل هو جيم غيلينغ Jim Gehling من متحف أستراليا الجنوبية South Australian Museum الذي يقع بجانب جامعة أديليد. فقد أشرف غيلينغ على المعرض الجديد لأحافير الإدياكاريات في القاعة الكبيرة العصرية المرمّمة حديثاً في المتحف. وبخلاف العديد من المتاحف الجديدة، حيث تُحفظ الأحافير الحقيقية بعيداً عن الجمهور مستبدلة بقوالب طبق الأصل من الجص أو غيره، فإن صالة عرض الإدياكاريات الذي أشرف عليه جيم غيلينغ[3] تعرض الأحافير الحقيقية، الإدياكاريات الحقيقية. والمفاجئ هو كم هي كبيرة ومعقدة لكن المفاجأة الأخرى هي طريقة تفسيرها. فحتى وقت قريب، كان العرف الرسمي لفترة طويلة أن هذه كانت مخلوقات غريبة ثابتة (غير متحركة) Sedentary مسطحة أساساً مثل وسائد محشوة تقبع على قاع البحر (وبعضها كبير بحجم وسادة كبيرة، إن كانت

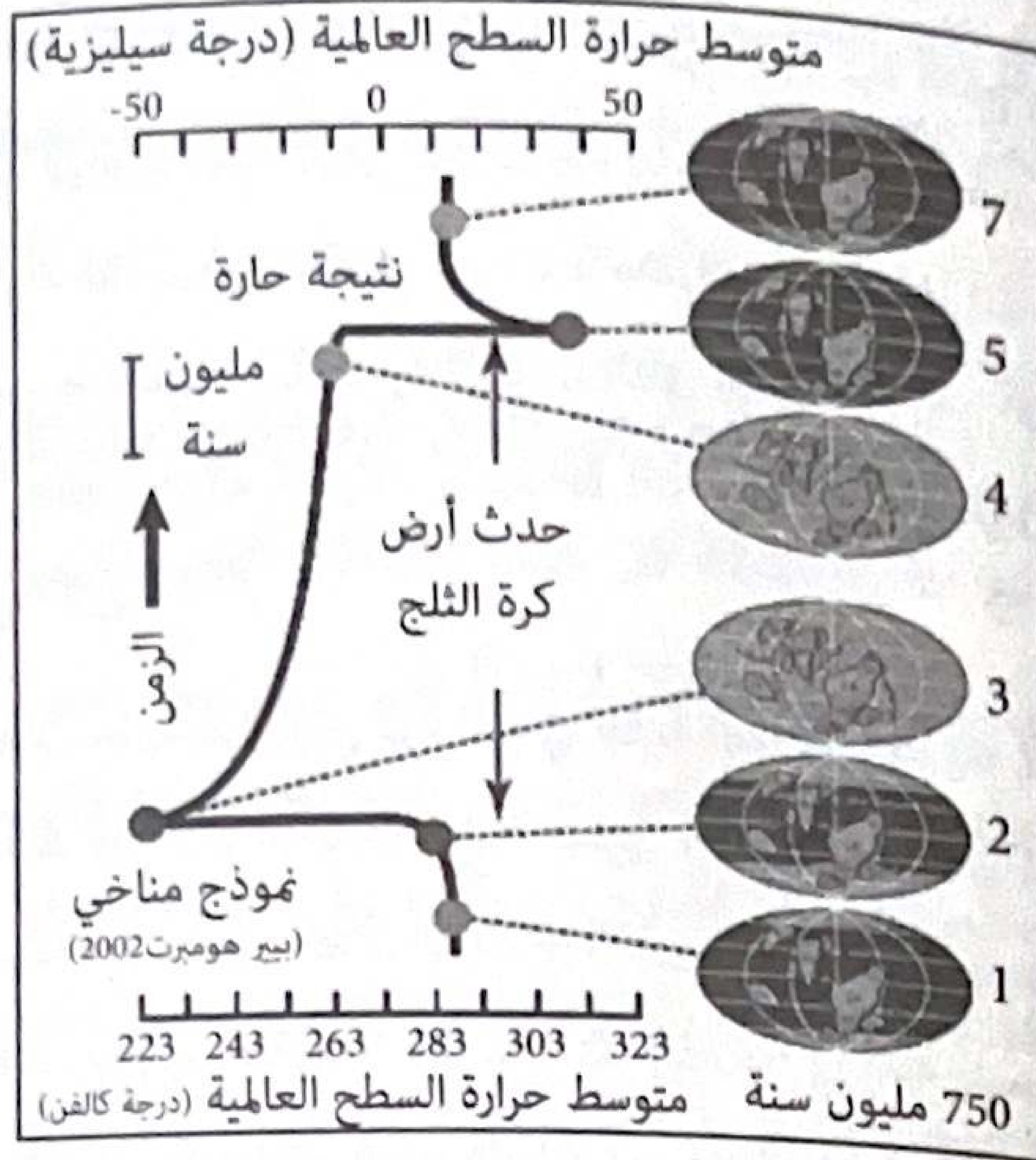
مسطحة). لكن الشاشات التلفازية في القاعات نفسها تعرض الصور المتحركة للشكل المفترض لهذه الأشياء، وهذه الصور لا تقدمها على أنها ثابتة، بل إن بعضها يسبح، والآخر يتحرك بنشاط. وهنا يكمن الخلاف. هذا الرأي جديد، لكن هل هو صحيح؟

الفترة الزمنية لهذا الفصل فترة طويلة تبدأ منذ نحو بليون سنة وتنتهي مع بداية العصر الكامبري Cambrian period منذ نحو 540 مليون سنة. فخلال هذه الفترة حدثت تغيرات في تاريخ الحياة أكبر من أن توصف بالكبرى. فمثلما حدث في الفترة ما بين 2.5 - 2.4 بليون سنة مضت، برُدت الأرض منذ نحو 717 مليون سنة؛ بردت بشدة - كما حصل قرب نهاية الدهر السحيق (الأركي) Archean Era- لدرجة أن المحيطات بدأت تتجمد ابتداءً من خطوط العرض العالية ثم امتدّ ذلك إلى خطوط العرض الأخفض، حتى تغطى كل المحيط من القطبين إلى خط الاستواء بالجليد. وتحولت الأرض مرة أخرى إلى كرة ثلج. ففي المرة الأولى أدى ذلك الحدث الفريد إلى ثورة كبيرة في تاريخ الحياة، فأدى إلى تشكّل غلاف جوي غني بالأكسجين. أما في المرة الثانية؛ فقد أنتجت أرض كرة الثلج من دهر الطلائع أيضاً تأثيرات بالغة الأهمية، حتى ولو أنها شديدة الاختلاف. فهذه المرة أدت كرة الثلج إلى ظهور الحيوانات، ولكن ليس من دون خطورة على جميع أشكال الحياة على الأرض. ومرة أخرى كانت الحياة على كفة الميزان. والسؤال الأساسي هو ما إذا كانت نوبات أرض كرة الثلج في هذه الفترة الزمنية هي الأسباب الرئيسة للظهور المفاجئ للحيوانات، وهذه هي القضية التي سنطرحها.

الحياة وأحداث كرة الثلج

كما رأينا في فصل سابق، يبدو أن الحدث الأول لأرض كرة الثلج (الذي بدأت قبل نحو 2.35 بليون سنة) كان ناجما عن الحياة: التزايد الانفجاري للسيانوبكتيريا سبب نقصاً في تأثيرات الدفيئة Greenhouse effect لمحتوى الغلاف الجوي من الميثان وثاني أكسيد الكربون. أما بداية هذه السلسلة الثانية والأخيرة من أحداث أرض كرة الثلج في تاريخ الأرض الطويل حتى اليوم؛ فقد حدثت خلال زمن العصر الكريوجيني Cryogenian period الموصوف في الفصل الأول. ونتيجة للأبحاث الأخيرة على معايرة العصر الكريوجيني، نعلم الآن أنه كان هناك على الأرجح حدثان كبيران يبدآن عند 717 مليون سنة مضت وينتهيان عند 635 مليون سنة مضت. وتقع بداية هذه السلسلة الثانية والأخيرة من أحداث أرض

كرة الثلج أساساً في وسط ما يعرّف رسمياً اليوم بالعصر الكريوجيني في مقياس الزمن الجيولوجي (ويبدأ قبل تحولين حادين في النظائر، أقدم قليلاً من 800 مليون سنة مضت، وهي نتيجة تذبذب انحراف القطب الحقيقي True polar wander.)



مخطط يظهر معدل ارتفاع الحرارة وانخفاضها على مرّ الزمن في أحداث أرض كرة الثلج.

لقد سَبَّبَ كل من حدثي أرض كرة الثلج المختلفين (ويتألف كل منهما من حادثة تجمد المحيط ثم ذوبانه) انخفاضاً شديداً في الإنتاج العضوي البحري؛ لأن جليد البحر حجب ضوء الشمس. ولذلك تقلصت كمية الحياة على الأرض المقاسة بكتلتها الكلية (المعروفة بالكتلة الحيوية Biomass) إلى كمية قليلة مقارنة بما قبل الحدثين وبما بعدهما. ولابد وأن هذا التعاقب بين تجمدات كرة الثلج ونهاياتها بسبب تأثير الدفيئة الفائق خلال الفترتين من 2.35 إلى 2.22 بليون سنة ومن 717 إلى 635 مليون سنة فَرَضَ غربلة بيئية شديدة على تطور الحياة. ولا يقدم السجل الأحفوري إلا القليل من الأدلة، لكن الأكريتارك Acritarchs التي وصفت سابقا في الفصل الأخير (كائنات حية عوالقية (بلانكتونية) صغيرة الحجم) ازدادت ونقصت من حيث تنوعها وكثرتها.

من المعروف أن العديد من الكائنات الحية تستجيب للإجهاد البيئي Environmental Stress بإعادة تنظيم شاملة لجينومها، وقد كان كل حدث أرض كرة الثلج مُجهِدا على أقل تقدير. فالأهمية التطورية والنمائية لمثل هذه التغيرات الجينومية هي مواضيع ساخنة لأبحاث البيولوجيا الجزيئية. وحقيقة تنوّع أحافير

الكائنات الحية الأكثر تعقيداً مما كانت عليه قبل بداية الحدث وظهورها في انتهاء العصور الجليدية لأرض كرة الثلج، يؤيد فكرة أن أحداث أرض كرة الثلج أطلقت تغيرات واسعة في تعقيد الحياة وتنوعها.

وأحد أكثر الأسئلة الجوهرية بخصوص أحداث أرض كرة الثلج يدور حول سبب ذلك. ذكرنا سابقاً أن أول حدث أرض كرة الثلج ربما أطلقته الحياة نفسها عندما ابتكرت البناء الضوئي المُولِّد للأكسجين، والذي تسبب باستنزاف سريع لغازات الدفيئة. لكن قد يكون هناك سبب مختلف تماماً لبداية الحدث الثاني الذي وقع بعد أكثر من بليون سنة من الأول. فربما تكون حركة القارات والنشاط التكتوني في ذلك الوقت هما ما أطلق حدث كرة الثلج الثاني.

وقعت أحداثُ ما يسمّى أرض كرة ثلج في حقبة الطلائع الحديثة Neoproterozoic snowball events. والحدثُ الأحدثُ من الحدثين الكبيرين من أرض كرة الثلج وقع بعد نحو 40 مليون سنة من بداية انحلال الاندماج القاري العظيم – ما يُدعى القارة العملاقة Supercontinent رودينيا Rodinia (اندماج كل القارات في كتلة يابسة متصلة واحدة). وغالباً ما تتميز القارات العملاقة بمناخ قاحل؛ لأن معظم مساحاتها الأرضية بعيدة عن المحيط. وعلى العكس من ذلك عندما تتفرق القارات وخاصة القارات العملاقة، تحل المناخات البحرية محل مناخات المناطق القاحلة السابقة، متيحة الفرصة لزيادة التجوية الكيميائية. والتجوية الكيميائية لمعادن الصخور السيليكاتية تسبب انخفاضاً سريعاً لتراكيز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي، ومع انخفاض ثاني أكسيد الكربون تنخفض درجات الحرارة. وفي هذه المرة الثانية ربما لم يكن العامل الرئيس للتبريد هو الحياة بل التفاعلات الكيميائية اللاعضوية. ومن المثير للاهتمام أن بداية حدث كرة الثلج الثانية (المسماة الفترة الستورتية Sturtian على اسم بروزات صخرية في أستراليا) تزامنت بدقة مع اندفاع إقليم بركاني ضخم في كندا قبل 716.5 مليون سنة.[3] وعلى الرغم من أنّ قدرا من ثاني أكسيد الكربون ينبعث خلال انفجار هذه الأقاليم البركانية الكبيرة، إلا أنها إذا ثارت على اليابسة فإن الانخفاض في غازات الدفيئة يتجاوز ما تقذفه البراكين؛ فيقترب بالنظام إلى نظام كوكب أكثر بياضاً لدرجة أن معظم ضوء الشمس ينعكس مرة أخرى إلى الفضاء، وينتج ذلك برودة أكثر فأكثر.

لكن ربما ليست هذه القصة كاملة. ولو كان بإمكاننا بيان أن نوعاً جديداً من الحياة النباتية ازداد عدداً بشكل مفاجئ وجذري حول العالم؛ لازداد مرة أخرى احتمال

أن يكون النقص المفاجئ في ثاني أكسيد الكربون قد نجم عن البناء الضوئي أكثر من التجوية الكيميائية. وفي الواقع ربما كانت تلك هي الحال. فبعض من مفاهيمنا الأكثر حداثة حول تاريخ الحياة تقول إن نباتات اليابسة التي ما زالت وحيدة الخلية Single Cell؛ لكن مع ذلك يحتمل أنها امتدت فوق مساحات شاسعة من الأرض، كانت قد ظهرت منذ نحو 750 مليون سنة، وربما قامت هذه النباتات بالمطلوب.

الانقراض الجماعي بفعل كرة الثلج: هل كانت كرة الثلج حافزاً لنشأة كل هذه الأشكال العديدة من الحيوانات؟

ما الذي سيكون قد حدث للحياة على الأرض بين نحو 750 إلى أكثر بقليل من 600 مليون سنة عندما تحولت من عالم المحيطات واليابسة إلى عالم الثلج والجليد والصخور العارية؟ تقترح تجربة ذهنية بسيطة أن وفرة الحياة على الأرض وتنوعها الموجودين قبيل حدث أرض كرة الثلج في دهر الطلائع سيتناقصان. فقد كانت الحياة حينذاك تتألف من الأشكال وحيدة الخلية في الغالب، مع أن النباتات متعددة الخلايا مثل اللاميناريا والطحالب (الحمراء والخضراء) الشائعة التي تزين كثيراً من شواطئ البحر في عالمنا كانت قد ظهرت في ذلك الزمن. ولكن أغلب الحياة كان يتألف إما من بروتوزوا وحيدة الخلية Single-celled protozoa، وهي كلها من حقيقيات النوى، أو صفائح واسعة من البقع البكتيرية والمستعمرات البكتيرية سواء على شكل الستروماتوليت أم كتل أخرى من البكتيريا الزرقاء بالقرب من الشواطئ، وأيضاً كتل حيوية ضخمة في البحار من ميكروبات وحيدة الخلية قادرة على البناء الضوئي. وعلى اليابسة نفترض أن تجمعات وحيدات الخلية (وربما حتى تجمعات أكثر تعقيداً من كائنات حية تقوم بالبناء الضوئي، بما في ذلك أغطية كبيرة من الميكروبات) كانت تقطن في المياه العذبة، وربما أيضاً في المناطق الرطبة من اليابسة. ولم تكن التربة بمعناها المعاصر قد ظهرت بعد، لكن من المؤكد أن التجوية الكيميائية لسطح الصخر، وتضمين أجسام النباتات الميتة والمتعفنة الموجودة هناك، ستكون قد أضافت المركبات العضوية إلى الغضار والرمل على سطح اليابسة. وبالنسبة إلى سطح كل من البحر واليابسة، حلَّ الجليد على سطح البحر والجليد وبالتأكيد البرد على سطح اليابسة.

من السهل تخيل وفهم كامن الانقراض من حيث الكتلة الحيوية. فجليد بسماكة كيلومتر يغطي سطح البحر سيكون قد أنقصَ بشكل كبير ضوء الشمس. وعلى الرغم من أنه توجد حياة ميكروبية في الجليد، وفي الواقع يتسلل بعض ضوء الشمس عبر الجليد، فإنه من المؤكد أن الكتلة الحيوية للحياة النباتية ستكون قد انهارت. وكانت خسارة أشعة الشمس جزءاً من القصة، لكن ربما كان بالأهمية نفسها فقدان المغذيات المهمة، من حديد ونترات وفوسفات بالغة الأهمية في عالمنا. ومع تبرد سطح اليابسة التي غطى العديد من أجزائها الثلج والجليد، تباطأت التجوية الكيميائية، كما هبطت حيوية ووفرة «نباتات» اليابسة مهما كان شكلها (هذا بالطبع قبل مئات الملايين من السنين من ظهور نباتات اليابسة الحقيقية المعقدة ذات السوق والأوراق). ولكن اليابسة ستكون قد أنتجت سماداً أقل بكثير ليصل إلى البحر، فانهارت إنتاجية المحيطات وتلا ذلك بالتأكيد الانقراض الجماعي ليس فقط للأفراد بل أيضاً للأنواع.

وينبع من هذا السيناريو نموذجٌ قد يجيب عن السؤال عن سبب وجود هذا العدد الهائل من أشكال الحيوانات. فعلى الرغم من أن سطح المحيط كله كان قد تجمد بصفائح جليدية، فإن النشاط البركاني في عالم تلك الفترة كان أكثر بكثير منه اليوم. وعندها سيكون هناك العديد من الينابيع والفوارات الحارة Gysers، وبشكل خاص براكين نشيطة تفجر الحرارة في المحيطات، فتنتج مناطق دافئة صغيرة من مياه مفتوحة خالية من الجليد، محاطة بجبال جليدية ثم بالبحر المتجمد. وهذه الأحواض المائية الصغيرة ستكون معزولة ومتوزعة حول العالم، وتخضع بشكل فردي لأنواع عديدة من شروط بيئية مختلفة. فالتطور يعمل بشكل أفضل في المجموعات الصغيرة المعزولة. وقد كانت الآلاف من هذه الملاجئ الصغيرة في البحار أو حتى في المياه العذبة عبارة عن حاضنات تطورية، مستخدمة مبدأ «عنق الزجاجة الوراثي» Genetic bottlenecks (إذ تستطيع المجموعات الصغيرة عندما تنعزل، التطورَ بسرعة بسبب عدد جيناتها الصغير). وبهذه الطريقة يحتمل أن تكون الطلائعيات Protozoa، أي حقيقيات النوى الصغيرة وحيدة الخلية، قد تطورت إلى أشكال مختلفة من الحيوانات عديدة الخلية Metazoans. ومع انقشاع كرة الثلج نتيجة التراكم التدريجي لغازات الدفيئة من كل تلك البراكين النشيطة، حدث ذوبان سريع للجليد، وكذلك إفراج سريع لتلك الآلاف من التجارب التطورية الجديدة.

لقد خرجت الأرض من كرتها الثلجية الأخيرة منذ 635 مليون سنة، وكانت مكاناً مختلفاً جداً عن الكوكب الذي نعرفه اليوم، لكن القوى - التطورية منها والفيزيائية على حد سواء - كانت قد بدأت الطريق الذي سيجعل أرضنا بأواخر دهر الطلائع أكثر شبهاً

بالأرض بالمعنى الذي نعرفه. وكانت المحيطات تعج بالحياة، ومعظمها كانت وحيدة الخلية لكنها تآلفت بشكل كبير من الطلائعيات المعقدة مثل أنواع الأميبا Amoeba والباراميسيوم Paramecia، وتلك الكائنات الغامضة: نصف نبات ونصف حيوان، مثل الفولفوكس Volvox عديد الخلايا، واليوغلينا Euglena وحيدة الخلية. وزُينت الشواطئ وقيعان البحار بأنواع متنوعة من اللاميناريات، وبالأحرى بالطحالب الكبيرة الحمراء والخضراء متعددة الخلايا التي كانت شائعة جداً على الأرض ولا تزال. ومُهدت الطريق لتطور أوائل الحيوانات، وبدأت تلك العملية قبل نحو 635 مليون سنة. ونعتقد أن العصر الإدياكاري -المُسمّى حديثاً- بدأ عند نهاية كرة الثلج الأخيرة وانتهى بظهور المخلوقات التي كانت حيوانات بما لا شك فيه. وهي أيضاً الفترة الزمنية الأخيرة الرسمية قبل بداية حقبة الحياة القديمة (الحقبة الأولية). وقد سُمّي ذلك الزمن على اسم قاطنيه الأكثر أهمية، تلك الكائنات الحية التي كانت الأكثر تعقيداً حينذاك، والتي ندعوها الإدياكاريات.[6]

وتكشف هذه الأحافير الشهيرة الأيقونية من أواخر الزمن قبل الكامبري، أي من الجزء الأخير من دهر الطلائع، عن وجود مجموعة واسعة من أنماط جسم غريبة لا تشبه أي شيء على قيد الحياة اليوم. وبينما لم تكن معروفة أول ما اكتشفت إلا من التلال الإدياكارية في جنوب أستراليا، فهناك الآن العديد من المواقع على الأرض اكتشفت فيها هذه الأحافير الغامضة. إلا أن التلال المنخفضة شمالي أديليد لا تزال هي الأفضل.



تلال إدياكارا هي جزء من أكبر سلسلة جبلية في القسم الجنوبي لأستراليا، ألا وهي جبال فلندرز Flinders Ranges. وكما هي الحال في أغلب مناطق أستراليا خارج المناطق الساحلية الأكثر خضرة، يتكون أغلب جبال فلندرز من الرمل والبروزات الصخرية ونباتات مبعثرة تكيفت مع البيئة شبه القاحلة. وتتناثر هنا وهناك أشجار أكبر، بما في ذلك شجر اللبان السكري Sugar gum، والسرو الصنوبري Cypress pine، والبلوط الأسود Black oak. وتندر تجمعات المياه على مدار السنة، وحينما توجد يكثر حولها مجموعات من حيوانات (وحيش Fauna) أستراليا

الأيقونية: حيث ازدهرت الكناغر الحمراء والكناغر الرمادية الغربية في المنطقة منذ القضاء على كلاب دينغو الأسترالية المفترسة التي كانت تشكل الخطر الأعظم عليها ذات يوم. واليوم يمكن مشاهدة حتى النوع المهدد بالانقراض سابقاً هو الولب الصخري Rock wallabies أصفر القدمين بانتظام. لكن هذه الكناغر والحيوانات الجرابية الأصغر ليست هي التي تجعل هذا المكان متميزاً، بل هو الحيوانات الأحفورية القديمة.

وقد توصف التلال الإدياكارية بأنها واحد من أشهر أربعة مواقع أحفورية في العالم إضافة إلى طَفْل بيرغِس Burgess Shale في كندا، ومقالع الحجر الجيري في زولنهوفن Solnhofen Limestone في ألمانيا، وتكوين هيل كريك Hell Creek Formation في أمريكا الشمالية. ويتراوح عمر هذه التلال بين 560 و540 مليون سنة، وتحوي سجلاً اتفق معظم علماء الأحافير على أنها أولى أحافير معروفة لأجسام حيوانات.



طبعة من أواخر ما قبل الكامبري لحيوان شبيه بالدودة المُفصَّلة لكائن يدعى سبريغينا *Spriggina*، أحفورة إدياكارية من جنوب أستراليا. ويعتقد أن يكون هذا دودة حلقية بدائية Annelid، ومن المحتمل أنها سلف لثلاثيات الفصوص (التريلوبيت Trilobites).

وقع الاكتشاف عندما كان عالم الجيولوجيا ريغينالد سبريغ Reginald Sprigg يفحص المناجم القديمة في منطقة تلال إدياكارا بجنوب أستراليا. وكان سبريغ عالم جيولوجيا موظفاً لولاية جنوب أستراليا. وقد كان يمشي عبر منطقة مقفرة ريفية، قريبة من التلال المتآكلة كجزء من إعادة تقييم الخيرات المعدنية في الولاية، وكانت مهمته أن يقرر ما إذا كانت هذه المنطقة تحديداً يجب أن تصبح بؤرة لنشاط تعديني جديد. غير أن سبريغ كان كذلك من

الهواة المتحمسين لجمع الأحافير منذ أيام دراسته، فاستطاع أن يدرك أن العلامات الغريبة التي صادفها في كتل من الحجر الرملي المتبعثر في جميع أنحاء التلال الإدياكارية المتموجة يجب أن تكون قد أنتجت من قِبل حياة ما. ولكن من أي نوع؟

لقد وجد سبريغ ما بدا أنه طبعات Casts وأثر Impressions لقنديل البحر. وكان يعرف أن قنديل البحر نادراً ما تتأحفر، وكلمة «نادراً» تعبير ملطف في أحسن الأحوال، إذ كان يُعتقَد أنها لا تتأحفر أبداً. وكانت الطبقات التي كان سبريغ يبحث فيها قديمة جداً، وقد كان محقاً في تخمينه أن الأحافير الغريبة التي جمعها لابد أنها كانت ضمن أقدم السجلات المباشرة للحياة الحيوانية في العالم؛ وهذا كان تصريحه عندما أعلن أول مرة عن اكتشافه بعد سنة من عثوره على أول أحفورة. وأشار سبريغ إلى أن الأحافير يبدو أنها تمثل حيوانات من انتماءات مختلفة.[7]

وبعد فترة وجيزة من ذلك الإعلان الأول جمع سبريغ أحافير أكثر غرابة، وهذه المرة برفقة البروفسور دوغلاس موسن Douglas Mawson وطلابه من جامعة أديليد. ونشر سبريغ في عام 1949 بياناً كاملاً للاكتشاف بناءً على مجموعة أكبر بكثير من المكتشفات في الموقع نفسه، فضلاً عن أول وصف تفصيلي لهذه الأحافير اللافتة للنظر.[8] وكانت كلها من طبقة كوارتزيت باوند Pound Quartzite، وهو تشكيل جيولوجي لم يكن قد حصل على تحديد عمري دقيق قطُّ. فإذا كانت هذه الأحافير من العصر الكامبري، فإنها لن تكون أمراً ذا أهمية كبيرة. أما إذا كانت من دهر الطلائع؛ فإن الأحافير الغريبة ستكون بالفعل البقايا الحيوانية الأقدم المعروفة على الأرض. وقد بينت الأبحاث اللاحقة أنها بالفعل كانت أقدم من الأحافير الكامبرية الكلاسيكية (التريلوبيت) التي كانت حينها مستخدمة لتعريف الكامبري (التعريف الذي أعيدت مراجعته منذ ذلك الوقت).

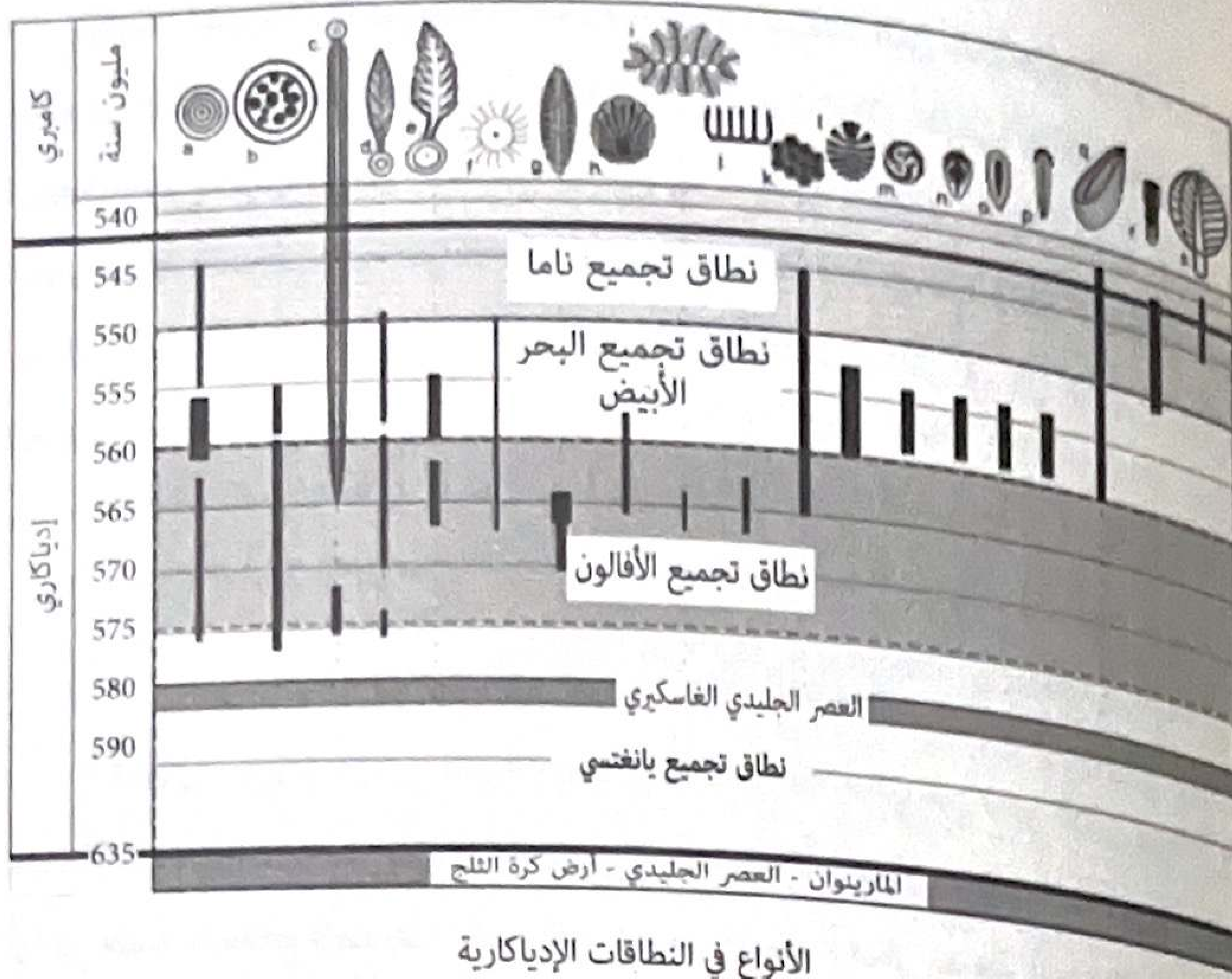
وعندما فحصت هذه الأحافير بالتفصيل كانت بالفعل مختلفة عن أي حيوان حيٍّ معروف. ووفقاً لبعض العلماء من أواخر القرن العشرين، فإنها أتت بالفعل من حيوانات ذات بُنية جسدية لم تعد موجودة، وليست لها ذرية معروفة. وقد تبنى وجهة النظر تلك أول مرة العالم العظيم الراحل دولف زايلاخر Dolf Seilacher.[9] ولكن أغرب ما في ذلك اللغز كان تحوُّل تلك الكائنات إلى أحافير أساساً. فأولاً وقبل كل شيء، فإن الكائنات الحية من دون أجزاء صلبة نادراً ما تتحول إلى أحافير، وحتى لو تأحفرت، فلا يحدث هذا غالباً إلا في صخور من حبيبات ناعمة جداً، مثل الصخور الطينية أو الطَفَل، تلك الصخور الرسوبية التي تترسب في قيعان مسطحات مائية هادئة وراكدة. وتلك المخلوقات التي اكتشفها سبريغ، والتي من الواضح ألّا هياكل لها، قد حُفظت في صخور رملية، وليس في أنواع الصخور ذات الحبيبات الدقيقة.

لتحديد ما إذا كان مصدر أحافير سبريغ بالفعل من أقرب الأنواع الحية شبهاً بها، وهي قنديل البحر وشقائق البحر Sea anemone والمستعمرات الرخوة للمخلوقات الشبيهة بشقائق البحر التي تسمَّى ريشات البحر Sea pens، فقد أجريت تجارب واختبارات لمعرفة ما إذا كان مثل هذا التأحفر ممكناً أساساً. وأجرى أحد هذه الاختبارات مارتين غليسنر Martin Glaessner عالم الجيولوجيا الأسترالي ومؤلف كتاب فجر الحياة الحيوانية، دراسة حيوية تاريخية *The Dawn Of Animal Life: A Biohistorical Study*[10]. ويصف غليسنر سلسلة من التجارب مستخدماً قنديل بحر كبيرا جداً اصطيد حديثاً، وضع على طبقة رقيقة من الرمل، فلاحظ أن قنديل البحر ترك انطباعات في الرمل، لكن ما زالت هناك مشكلة في الرمل بحد ذاته، فأحافير سبريغ لم تكن لتحفظ إطلاقاً.

تترسب حبيبات الرمل في أمكنة ذات طاقة عالية نسبياً. ويعثر على الصخور الرملية حاليا قرب المحليات الشاطئية وفي الأنهار والكثبان الرملية، وكل الأمكنة التي يستطيع فيها الماء الجاري حمل هذه الحبيبات الثقيلة إلى حد ما. ولا تترسب حبيبات الطين والطمي في مثل هذه البيئات أبداً، فهي خفيفة جداً لتستقر ولا تحمل مجدداً مع التيارات أو الأمواج أو الرياح وتنقل إلى مواضع أخرى. أما الأحافير الإدياكارية فهي كبيرة وكثيرة، ومع ذلك فهي موجودة في شروط تشكل الحجر الرملي من هذا النوع.

في صيف سنة 1987 دعا المؤلف المشارك بيتر وورد الطلاب المسجلين في صف علم الأحافير المتقدم، في مختبرات فرايدي هاربور بجامعة واشنطن في جزيرة سان خوان بولاية واشنطن، في محاولة لإعادة خلق الشروط التي تقود إلى تشكل الأحافير الإدياكارية وحل هذه المعضلة. وقد أجريت عدة أنواع من التجارب. وتحتوي البحار الداخلية الغنية حول جزيرة سان خوان على تنوع ووفرة كبيرين من اللاسعات Cnidarians، الشعبة التي تبدو الأكثر شبهاً بمظهر مخطط جسم الإدياكاريات. ولتقليد قاع ماء ضحل عمره 600 مليون سنة، مُلئت دلاء كبيرة من رمل ذي قياسات غربلة مختلفة ثم غمرت بماء البحر. وكانت هذه التجارب مماثلة لتلك التي أجراها مارتين غليسنر، ولكن في حالتنا كانت أجسام الكائنات المستخدمة أكبر، وقد درست أنواع أجسام غير قنديل البحر أيضاً.

لقد وضعت على الرمل أجساد ريشات البحر وشقائق البحر وبعض من قناديل البحر الأضخم في العالم التي نفقت حديثاً، ثم ردمت بنثر المزيد من الرمل فوق تلك الأجساد، ثم تركت التجربة لبعض الوقت. وبعد عدة أيام أزيلت الطبقة العلوية من الرمل. وفي الحقيقة لم تترك أي تجربة أي نوع من الآثار على الرمال، فاللاسعات تحللت، دونما أثر.



الأنواع في النطاقات الإدياكارية

أخيراً، خطرت لأحد الطلاب فكرة مختلفة تماماً، فقد وضع قطعة مربعة من شبكة نايلون دقيقة جداً -من جورب نايلون- على الرمل، ثم وضع برفق قنديل بحر كبيراً جداً على سطح النايلون. وأضاف المزيد من الرمل الناعم عندها فوق كل ذلك، مع قنديل البحر الكامل. وبعد ذلك غمرت سندويشات ريشة البحر وشقائق البحر هذه بمياه البحر. وبعد عدة أسابيع، عندما أزيلت الطبقة العلوية من الرمل وشريحة النايلون (وكانت الأجزاء الرخوة من الحيوانات الموضوعة هناك قد تحللت)، اكتشف أنه تحت جورب النايلون مباشرةً كان هناك انطباع جميل للحيوانات التي وضعت هناك، بما في ذلك المورفولوجيا التفصيلية جدا، تطابق الوجه السفلي للحيوانات المستخدمة في هذه التجارب.

ربما لا تعني هذه التجارب شيئاً. لكن ماذا لو كان العالم في ذلك الوقت مغطىً بشيء ما بسماكة مشابهة وخواص مادية مشابهة لجورب النايلون، لتكون له الخواص التي سمحت لحبيبات الرمل بأن تثبت في مكانها، والتي من دونها كان سيحملها أهون تيار بعيدا. ونستطيع أن نتصور عالماً حيث البيئات البحرية الضحلة مغطاة بطبقة رقيقة أو طبقات متعددة من حياة ميكروبية. ومع أنها هشة وتدمر بسهولة بالعواصف، فإن هذه الصفائح يمكنها أن تثبت الرواسب وتترك أيضاً انطباعات الأجزاء الرخوة في الرمل تحتها عندما تموت الحيوانات وتسقط نحو القاع ثم يغطيها مزيد من الرمل؛ ما يسمح بترسب طبقات جديدة من الرمل.

لم يعد لدينا مثل تلك البيئات البحرية حاليا، البيئات التي تستطيع حفظ ملامح وطبعات الكائنات الحية الغنية بالأنسجة لكنها من دون هيكل عظمي. وتطور الحيوانات المتحركة التي تمزق وتأكل الصفائح الميكروبية الغنية بالموارد دمرها تماماً. فمثلما اختفى الستروماتوليت كله مع تطور الحيوانات العاشبة، التهمت كذلك بالكامل كثير من الصفائح والحصائر الميكروبية التي يحتمل أنها كانت تعيش في كل البيئات المائية العالمية الضحلة؛ فمحيت من الوجود.

الحيوانات الإدياكارية العالمية

الكائنات الحية الإدياكارية معروفة حاليا من نحو ثلاثين موقعاً في ست قارات. وتصنف حيواناتها إلى سبعين نوعاً مختلفاً، أعمار جميعها محصورة حتى أواخر حقبة الطلائع الحديثة[11] (مع أنه يحتمل انتماء أعمار بضعة أنواع إلى ما قبل بداية الكامبري). ويبدو أن الكائنات الحية الإدياكارية تطورت نحو تنوعها الكامل في حدث تطوري يعرف بالتنوّع الأفالوني Avalon Diversification منذ 575 مليون سنة، وذلك خلال خمسين مليون سنة بعد انتهاء حدث آخر كرة ثلج في حقب.

ويبدو أن تلك الأحياء ازدهرت منذ ذلك الوقت، وازدهرت مجتمعات كاملة منها في الواقع. وبعد ذلك، قبل نحو 550 إلى 540 مليون سنة، عندما يظهر الدليل الأول على تحرك الحيوانات في السجل الأحفوري لذلك الزمن على شكل أحافير آثارية (أي الآثار المتأحفرة لنشاط الحيوانات، بما في ذلك علامات الحركة والتغذي المحفوظة في الرواسب)، تختفي الإدياكاريات بسرعة تكاد تكون مفاجئة. واختفت مجموعة متنوعة كبيرة من الكائنات الحية حالما ظهرت أوائل الحيوانات على الأرض بسرعة في حدث يعرف بالانفجار الكامبري.[12] وهذا الاختفاء هو حقاً أول انقراض جماعي كبير موسوم في السجل الأحفوري (مع أنه بالتأكيد ليس الانقراض الجماعي الأول). وبينما كان يُعتقد في البداية أن الإدياكاريات كانت معزولة في القارة الأسترالية، فقد اتضح الآن أنها كانت منتشرة في العالم.

وقد تعددت الفرضيات حول كيفية تدفق الطاقة عبر المجتمعات الأيكولوجية الإدياكارية.[13] ففي الأنظمة الإيكولوجية الحديثة، تشكل النباتات القادرة على البناء الضوئي

قاعدة سلسلة الغذاء، ثم يرعى عليها عدة مستويات من المستهلكين، والتي بدورها هي فرائس لعدة مستويات من المفترسين. والكتلة الحيوية لكل من هذه الخطوات هي نحو عشرة 10 في المئة فقط من المستوى "الغذائي" الأدنى منها. وتبدو الإدياكاريات بالنسبة إلى البعض نوعاً مختلفاً تماماً من بنية المجتمع، إذ لم يُعثَر قطُّ على أي فكٍ، ولا على أي إشارة إلى الافتراس على الإطلاق. ومع ذلك، فإن معظم الإدياكاريات تدخل في تصنيف اللاسعات، وهي مفترسة كلها! كان هناك فرضيات مفادها أن الإدياكاريات ربما كانت تحوي طحالب مجهرية تعايشية داينوفلاجيلات أو (دواميات السياط Dinoflagellata) بأعداد كبيرة، تماماً كما في الشعاب المرجانية الحديثة، لكن لا يوجد دليل على هذا. وبسبب الغياب الظاهري للمفترسات، كان أحد الأوصاف المميزة لهذه الفترة الطويلة الماضية هو جنة الإدياكارا، آخر مرة عاشت فيها الكائنات الحية الكبيرة في عالم خال من المفترسات. وتلاشت هذه الجنة قبل نحو 540 مليون سنة، وكانت حَيّاتُها التي أهلكتها هي التنوع الكبير من الحيوانات السابحة والزاحفة المفترسة (والعاشبة).

لماذا استُغرق الأمر وقتا طويلا لتتطور هذه الحيوانات المتحركة الأولى على الأرض؟ يحتمل أن تكون العوامل البيئية الخارجية مثل انخفاض أكسجين الغلاف الجوي، أو ارتفاع درجات حرارة الهواء والبحر هي المسؤولة عن ذلك. فما نعرفه هو أنه في الفترة الزمنية الواقعة قبل ما بين 635 و550 مليون سنة، تطورت فئة جديدة تماماً من الكائنات الحية، ذات أجواف داخلية مملوءة بالماء قد تؤدي وظيفة هيكل داخلي، أو هيدروستاتيكي، وكذلك مخلوقات ذات عضلات وأعصاب وخلايا حسية متخصصة وخلايا تناسلية Germ cells وخلايا نسيج ضام والقدرة على إفراز الأجزاء الصلبة الهيكلية المترسبة. وسواء اعتبرناها حيوانات أم لا، فقد كانت الإدياكاريات هي أول من طوّر الهياكل على الأرض، حتى ولو أن تلك الهياكل كانت غير ممعدنة Nonmineralized. وتسمح الهياكل بارتكاز العضلات، وتلك العضلات تسمح بالتحرك، ويخلق التحرك احتياجات أخرى تستمر بدفع التطور نحو تعقيد أكثر فأكثر. فعندما يتحرك الحيوان، فإنه يحتاج إلى معلومات حسية ليجد الطعام والأزواج، وليتجنب المفترسات، وتحتاج المعلومات الحسية إلى دماغ لمعالجتها. وكل هذه التطورات مترابطة، وكانت انتصارات لثورة الحيوانات متعددة الخلايا حقيقية النوى، وهذا ما حدث بالفعل قبيل نهاية دهر الطلائع.

ويمكننا الآن أن نطرح الفرضيات حول ظهور ما يمكن أن نسميه الحيوان الجذعي متعدد الخلايا Stem metazoan، السلف الوحيد لكل الكائنات الحية المعقدة الموجودة

الآن على الأرض. ويفترض أنه كان صغيراً يتكون من عدد صغير نسبياً من الخلايا. ولم تكن بداخله جدران خلوية، ويفترض أن لديه ظهارة Epithelium تعزله جيداً عن البيئة الخارجية، لكن لديه فجوات داخلية مملوءة بالكولاجين تمنح جسم الحيوان الصلابة. كما لديه «مجموعة أدوات جينية» تسمح له بالزيادة من حيث الحجم والتعقيد. فحقيقيات النوى متعددةُ الخلايا الكبيرة والمتخصصة إيكولوجيا والمتكاثرة جنسياً: تلك هي الكائنات الحية التي أنتجت التشعُّب التكيُّفي Adaptive radiation الأعظم للحياة مؤدية إلى ذلك التنوع البيئي الحيواني الزاحف والمتلوي والسابح والسائر والثابت الذي يميز الأرض الحالية. والحيواناتُ ذات التناظر الثنائي مثلنا تهيمن عددياً على المملكة الحيوانية المعاصرة. ولكن في أوائل الكامبري كانت قليلة العدد لكنها كانت جاهزة للاستيلاء على الأرض.

علم الإيكولوجيا القديمة للإدياكاريات الكبرى

عموما، تحل العلوم عموماً المسائل الشائقة بسهولة، لكن يبدو أن طبيعة الإدياكاريات قاومت جهوداً مضنية كثيرة، ولاتزال الإدياكاريات غامضة. ومع ذلك، فقد بدأت الأبحاث الحديثة تكشف تدريجياً أكبر الأسرار، واستخدم بعض من الأعمال الأكثر أهمية أحد ميادين علم الأحافير الذي أصابه شيء من التجاهل خلال بضعة عقود خلت، وهو الميدان المسمّى علم الإيكولوجيا القديمة Paleoecology. فبينما كان من العوامل المنشطة الرائعة لأبحاث علم الأحافير من ستينات القرن العشرين فصاعداً، إلا أنه فشل في إنتاج تعميمات جديدة كبرى، فرفضه ستيفن جاي غولد Stephen Jay Gould بصورة مقنعة في واحد من خطاباته عن وضع علم الأحافير نشر في أواخر القرن الماضي (العشرين). إلا أن ماري دروزر Mary Droser من جامعة كاليفورنيا ريفرسايد، وجيم غيلينغ Jim Gehling من متحف جنوب أستراليا استخدما هذه المنهجية القديمة في هذا القرن للتوصل إلى الفهم الأفضل ربما حتى الآن حول الإدياكاريات الأكبر وعالمها.

وجوهر عمل غيلينغ ودروزر (والعكس بالعكس) هو أن ما نحتاج إليه هو دراسة الإدياكاريات في سياق ارتباطها بالحصائر الميكروبية المبطنة لقاع البحر التي يفترض أنها كانت منتشرة في كل مكان، وغزارة الحصائر الميكروبية كانت المؤثر الرئيس في طبيعة البيئة وعلى وجه الخصوص على طبيعة الرسوبيات في هذه المجتمعات. ولما كان هناك القليل فقط من الكائنات الحية الحافرة للجحور أو لم تكن موجودة أساساً، بخلاف

قيعان البحار في عصرنا المحروثة بالجحور في كل مكان، فإن من شأن طبيعة الإيكولوجيا في تلك التجمعات ألا تشبه أي شيء نعرفه.

ويحتمل أنه كانت هناك أربعة أنواع من أنماط الحياة الحيوانية التي تترافق مع الحصائر الميكروبية، وهي: مطعِّمات الحصيرة Mat Encrusters، الأشكال التي جلست فوق الحصائر وربما أفرزت أنزيمات هاضمة كافية لتحلّل الحصيرة التي تثبتت عليها لتتغذى بها؛ وكاشطات الحصيرة Mat Scratchers، الأشكال التي ترعى على الحصائر عملياً؛ وملتصقات الحصيرة Mat Stickers التي تنغمر في الحصيرة جزئياً وتنمو إلى الأعلى حسب تغير مستوى الحصيرة (لأن الحصيرة يفترض أن تنمو إلى الأعلى نحو الشمس، مثل الستروماتوليت)؛ والحافرات تحت الحصيرة Undermat Miners التي تحفر أنفاقاً تحت الحصيرة. ويبدو أن معظم هذه الاستراتيجيات استمرت إلى أوائل الكامبري، وبعد ذلك تغير العالم بسرعة بسبب انتشار حفر الجحور والكائنات الحية الأكبر، وكذلك آكلات اللحوم والعواشب النشيطة ذات الهياكل أو الأجهزة الفكية القاسية.

ولا يمكن فهم هذا العالم من الكائنات الحية الغريبة والعجيبة إلا في سياق كيفية حُفظها. ومن التعميمات المثيرة للاهتمام من قبل المتخصصين الذين يدرسون الكائنات الحية الإدياكارية، هو أن الأحافير تشبه «أقنعة الموت» الجبصية من القرون السابقة، التي استُخدِمت من أجل الموتى والمشرفين على الموت من الملوك والنبلاء من الحضارة الأوروبية وغيرها من الحضارات، إذ يؤخذ بعد الموت مباشرةً انطباع لوجه شخص ما كان مشهوراً (حينذاك)، وأحافير الإدياكاريات التي نراها قد تكون الشيء نفسه؛ أي ليست أحفورة متحجرة حقيقية للحيوان بل نسخة من الوجهين العلوي والسفلي للمخلوق. وتطلبت صناعة أقنعة الموت أن تتصلّب المادة المستخدمة لصناعته - مهما كانت تلك المادة - تصلباً سريعاً، لذلك يعتقد أن الأحافير الإدياكارية مصنوعة من مواد تتصلب بسرعة فوق أجسادها الميتة.

الأحافير المجهرية الشائكة من العالم الإدياكاري

ذكرنا في الفصل السابق عمل آندي نول Andy Knoll وفريقه من جامعة هارفارد فيما يتعلق بدراستهم ليس للأحافير الأكبر من العصر الإدياكاري بل لأحافيره المجهرية. فقد هيمنت وحيدات الخلية طوال بليون سنة على العالم، والأحافير التي تركتها كانت

بشكل أساسي عبارة عن كريات صغيرة ملساء الجدار. ولكنْ مع خروج العالم من آخر أدوار أرض كرة الثلج في حقبة الطلائع الجديدة، يصبح السجل الأحفوري ممتلئاً بأحافير مجهرية ذات أشواك ومزخرفة بالتفاصيل. وقد تخبرنا هذه الفترة القصيرة نوعاً ما في السجل الأحفوري بأشياء مهمة حول طبيعة الارتقاء العام للحيوانات نحو التعقيد. ولا تظهر هذه الأحافير المجهرية قبل أكثر من 600 مليون سنة ومن ثم تختفي قبل نحو 560 مليون سنة، وبذلك تكون الأحافير الإدياكارية العينية الأكبر حجماً قد عاشت عشرين مليون سنة أطول منها). وكانت الأحافير المجهرية قبل هذه النقطة من كائنات حية وحيدة الخلية حصراً، أما هذه الأحافير المجهرية ذات الأشواك فربما كانت من حيوانات متعددة الخلايا. وما نشاهده في هذه الحالات هي مراحل ساكنة قصيرة، مثل التكيّسات Cysts.

كان هناك العديد من الدراسات المهمة لهذه الأحافير الصغيرة بما في ذلك التي أجراها عالما الأحياء التطوري/عالما الأحافير نيك بترفيلد Nick Butterfield وكيفين بيترسون Kevin Peterson،[14] اللذان ذكرا أن ظهور الأحافير المجهرية المزخرفة بشدة في الفترة الإدياكارية الباكرة كان استجابةً للحيوانات آكلة اللحوم الباكرة الصغيرة مثل أوائل الديدان الخيطية والمدورة الصغيرة، وأن أشواك تلك الأحافير الدقيقة تكون بذلك تكيفات دفاعية، تدعم هياكل الأحافير التي يفترض أنها كانت وحيدة الخلية. لكن مجموعة نول تطرح فرضية مفادها أن الأحافير المجهرية المزخرفة بشكل معقد هي أطوار ساكنة للحيوانات الباكرة نفسها، وهذا يفترض تطورا معقدا وباكرا للحيوانات بوقت طويل قبل ظهور الأحافير الإدياكارية الأكبر أساساً، كما يفترض أن البيئات الباكرة للحيوانات كانت بعيدة كل البعد عن جنة عدن الإدياكارا التي تصورها علماء الأحافير في أواخر القرن العشرين. فالحاجة إلى تكيس للسكون توحي ببيئة مفعمة بالتحديات، ومتفاوتة الأكسجين، بما في ذلك أوقات لا يحتوي خلالها عمودُ الماء على الأكسجين إطلاقاً، فضلاً عن احتمال انطلاق جرعات عرضية من كبريتيد الهيدروجين. وتستعرض هذه النظرة للحياة العالم الذي جرى فيه التطور الباكر للحيوانات على أنه مليء بالتحديات والظروف القاسية جدا، وسامّ في أحيان كثيرة.

لقد اختفت الأحافير المجهرية الشائكة قبل نحو 560 مليون سنة. وعندها حل محلها ما كان ازدهاراً للأحافير الإدياكارية الكلاسيكية التي عاشت كأكبر المخلوقات على الأرض حتى أطاحت بها مجموعة مختلفة من الحيوانات في بداية العصر الكامبري، قبل أكثر من 540 مليون سنة بقليل.

البحث عن ثنائيات التناظر

إذا كانت الأحافير المجهرية الشائكة هي مراحل ساكنة لحيوانات صغيرة وليست شكلاً من أشكال الطلائعيات Protista الكبيرة (أي كائنات حية وحيدة الخلية)، فكيف كان شكل تلك الحيوانات؟ فقرب الوقت نفسه الذي ظهرت فيه الأحافير المجهرية المزخرفة في السجل الأحفوري، يفترض أنه وقع حدث تطوري عظيم آخر، وهو ظهور الحيوانات الأولى ذات التناظر الثنائي؛ مما أدى إلى تحسن عظيم في التحرك. وكان بزوغ مخطط الجسم متناظر الجانبين معلماً تطورياً عظيماً آخر. فالحيوان الثنائي التناظر، له طرفان، أمامي وخلفي، متميزان، وأعضاؤه الداخلية متناظرة تقريباً على جانبي جسمه الشبيه بالأنبوب الذي يحوي طرفين أمامي وخلفي. فهذا كان شكل السلف المتوقع المفترض الذي قد نتوقع انبثاق تنوع الشعب الحيوانية عنه، لكن عمر تلك الأحافير الغامضة لا يزال مثيراً للجدل.

وتشير التحليلات الوراثية إلى أن هذا السلف يفترض أن يكون قد عاش قبل ما بين 570 و 660 مليون سنة،[15] لكنّ السجل الأحفوري لم يبين حتى الآن ما يفترض أنه كان مخلوقاً صغيراً بالتأكيد شبيهاً بالدودة ودون هيكل (وطوله ربما نحو مليمتر واحد). وعلى الرغم من أن هذا مثال على ما يستدعي التهجم على السجل الأحفوري من أيام داروين، إلا أنه يجب التخفيف على السجل الأحفوري: إذ إن احتمال حفظ مخلوق صغير رخو ليست له أجزاء صلبة هو احتمال ضئيل حقاً.

وأتت الأحافير من الصين لتنقذ الموقف.[16] فقد اكتُشِفت صخورٌ من عمر متطابق مع ما يعتبر التخمين الأفضل للفترة التي عاش فيها أول حيوان متناظر الجانبين، حيث اكتشفت في الصين في بداية القرن الحادي والعشرين. وبعد ذلك جرى تأريخ هذه الصخور على مهل بعناية وبدقة عالية، لتحديد فترة زمنية مُحدَّدة جداً، يعتقد عندها أن ثنائيات التناظر الأولى قد ظهرت فيها أول مرة. وبعد الانتهاء من ذلك العمل بدأ البحث عن الأحافير التي تتوقعها الحسابات النظرية، ولم تكن أي من هذه المراحل سهلة.

لقد استغرق الأمر ثلاث سنوات وأكثر من عشرة آلاف «مقطع رقيق» (تحضَّر بتقطيع كتلة من الصخر إلى شرائح ذات سماكة صغيرة جداً، ثم تصقل ليمر الضوء عبرها عندما توضع على رف المجهر)، فاكتشف حيوان مثل المتوقع تماماً. وكان أصغر

بكثير من ثُمْن بوصة (3 مم)؛ إذ عُثر على أحافير صغيرة كان طولها بعرض مقطع شعرة إنسان، وفحصها ودراستها. وكان عمر هذه العجائب الصغيرة التي سميت فيرنانيمالكيولا Vernanimalcula 600 مليون سنة تقريباً.

وها هي مرة أخرى حلقة مفقودة لم تعد مفقودة. فقد مهد هؤلاء الثوار الحقيقيون والمتواضعون والصغار، ثنائيو التناظر الباكرون، الطريق للمستقبل، ولم يقتصر عطاء تلك الطبقات على ما سبق ذكره. فإضافة إلى الأحافير ثنائية التناظر، اكتشفت في تكوين دوشانتوو Doushantuo Formation بجنوب غرب الصين بيوض الحيوانات الأبكر وأجنتها فأعطانا ذلك نافذة جديدة على عالم ما قبل 600 مليون سنة، وبيّنت الكيفية التي غيرت بها الحيوانات طبيعة سجل الطبقات الرسوبية.

لم يكن هناك قبل ظهور الحيوانات تعكّر بيولوجي Bioturbation للطبقات الرسوبية المتراكمة حديثاً بفعل الكائنات الحية. وفي أيامنا صار التعكّر البيولوجي شائعاً لدرجة تجعل من الصعب تخيل أوقات سابقة قبل أن يصبح التعكّر البيولوجي قاعدة لا استثناء. ولا نجد حاليا هذا النمط قبل الحيواني من الحفظ الرسوبي إلا في البيئات الغريبة، مثل قاع البحر الأسود، حيث القاع صلب والرواسب لأول متر تحت السطح تمتاز بكل من التراصف في طبقات والمحتوى المائي المنخفض جداً. وقد قارنوا ذلك بأي قاع بحر مؤكسج، حيث السنتيمترات القليلة من الطبقة فوق القاع ممتلئة بمواد عضوية من مخاط وبراز وبراز كاذب Pseudofeces ومواد عضوية متحللة... إلخ. وبالتعمق أكثر لن تجد تراصفا في طبقات Lamination: فكل شيء قد حُفر واستُهلِك مراراً وتكراراً. واللافقاريات بطيئة الحركة إما أنها تتغذى وهي تتحرك (فتدخل إليها الرواسب ويخرج منها البراز الغني بالرواسب بدوره) أو تهرب، فتترك خلفها جحور الحركة. فيكون محتوى قدر كبير من رواسب القاع من المياه عالياً نتيجة كل هذه الأفعال التي تقوم بها كل الحيوانات المتحركة.

ومقارنة بالتغيرات، فقد كان ذلك التغير عظيماً. وفي أواخر القرن العشرين أُطلق عليه وصف «الثورة الأغرونيمية» Agronomic revolution [هندسة المحاصيل والزراعة] وهي السمة الرئيسة المميزة لقيعان البحار في دهري الطلائع والبشائر وللسجلات الطبقية التي تركتها وراءها.[17] وقد كانت ثنائيات التناظر الجديدة تتحرك ليس فقط على السطح الفاصل بين الماء والترسبات التي كانت تستعمرها أكثر فأكثر، بل بدأ أيضاً سلوك الحفر العمودي بحفر

الجحور. وباعتقادنا لم يكن ذلك ليحدث من دون مستويات عالية من الأكسجين في البحر: فالأكسجة صعبة على أقل تقدير عند الحفر عبر الرواسب، ومستحيلة بالتأكيد إذا كانت تراكيز الأكسجين العامة أقل من عشرة في المئة تقديراً. فالنظرة القديمة هي أن الحيوانات المتطورة حديثاً، أكلت بشكل متزايد الستروماتوليت والحصائر الميكروبية حتى محتها من الوجود قرب الحد الطلائعي الكامبري، والرأي الجديد هو أن ثنائيات التناظر الصغيرة لم تكن فقط تأكل الحصائر الميكروبية الغنية بالمغذيات، بل كانت أيضاً تغير الطبقات الكثيفة المطلوبة لتتغير الحصائر من واسعة الانتشار إلى غير موجودة فعلياً.

وبنهاية زمن الطلائع صار العالم جاهزا للحيوانات، وكانت الأدوات الجينية الضرورية لتطور الأحجام الكبيرة والهياكل والأنواع الجديدة من الأنسجة الضرورية للنشاط كلها موجودة، ولم ينقصها إلا شيء واحد، وهو الأكسجين. وبعد آخر كرة ثلج منذ 635 مليون سنة كانت الحيوانات مستعدة، لكن تراكيز الأكسجين كانت منخفضة جداً. وقبل نحو 550 مليون سنة، كان ذلك قد تغير، إذ ارتفعت تراكيز الأكسجين.

ولكي ترتفع تراكيز الأكسجين بشكل دائم، فإنها تحتاج إلى زيادة كمية الكربون العضوي المدفون في الرواسب بدلاً من دفنه كحجر جيري. وتآكل الطين من القارات يقتنص معظم الكربون العضوي، ولذا فإن أي عامل يزيد من تدفق الطين، خصوصاً في المحيطات المدارية حيث الإنتاجية هي الأعلى، سيؤدي إلى ارتفاع في مستوى أكسجين الغلاف الجوي. ويقول أحد الاقتراحات إن نشوء بيوسفير أرضي من نوع ما ربما أدى إلى زيادة إنتاج الطين عبر التجوية،[18] وهذا تحقق بالتأكيد بعد أن طوّرت النباتاتُ البرية الأرضية الوعائية Vascular Plants على اليابسة القدرةَ على توليد جذور تنفذ عميقاً في التربة. كما أن التغيرات في مواضع القارات بالنسبة إلى خط الاستواء لها تأثير كبير أيضاً؛ لأن التجوية الكيميائية الفيزيائية أشد بكثير في المناطق المدارية الحارة منها في القطبين الباردين. وقرب بداية العصر الكريوجيني (لكن قبل كرات الثلج، قبل نحو 800 مليون سنة) كان هناك تغير تدريجي في دورة الكربون استمر نحو 15 مليون سنة، وخلال ذلك الوقت انخفض الجزء المدفون من الكربون العضوي بصورة فجائية. واكتشف حدث بيتر سبرينغس Bitter Springs event هذا أولاً في أستراليا الوسطى واكتشفت بعد ذلك في مواقع عديدة حول العالم. ومن

المفترض أنها سببت نقصاً عابراً في أكسجين السطح. وبقيت أسباب ذلك الحدث غامضة، حتى اكتشف فريق بحثي بقيادة آدم معلوف Adam Maloof من جامعة برنستون أن حدوث وانتهاء ذلك الحدث توافق مع زوج من تحولات تذبذبية سريعة جداً نحو 60 درجة في محور دوران الأرض (من تراكمات صخرية في سفالبارد يصعب لفظ اسمها دعيت مجموعة الأكاديميكربرين Akademikerbreen Group)[19]. وهذا النمط من التحول قد سُمّي «حدث انحراف القطب الحقيقي» *True polar* wander event (سنتناوله باستفاضة في الفصول المقبلة) ويتضمن الحركة السريعة الجيولوجية للأرض الصلبة بالكامل وصولاً إلى المعدن السائل في الحدود بين الوشاح واللّب. إلا أن هذه التحولات تحديداً أبعدت جزءاً كبيراً من القارة العملاقة رودينيا عن خط الاستواء إلى خطوط العرض الوسطى ومن ثم أعادتها مجدداً، فتذبذب دفن الكربون وإنتاج الأكسجين بالتزامن مع هذه الأحداث. فعندما تُظهر بيانات المغناطيسية القديمة Paleomagnetism والكيميائية الجيولوجية من مناطق مختلفة إلى حد كبير التحولات نفسها وبالوقت نفسه وبشكل متزامن، يمكننا أن نتعلم شيئاً ما حول كيفية عمل كوكبنا، وفي هذه الحالة كان الأكسجين. ونعتقد اليوم أنه ربما وقع ما لا يقل عن ثلاثة أحداث تقلقل قطبي حقيقي هذه خلال الثلاثة بلايين سنة الماضية،[20] وتزامن العديد منها مع أحداث مثيرة للاهتمام مثل الانفجار الكامبري.

8

الانفجار الكامبري:

قبل ما بين 600-500 مليون سنة مضت

إذا تأمّلنا الصور الفوتوغرافية لتشارلز داروين Charles Darwin وهو في السبعين من عمره، فإننا نرى فيها رجلاً عصفت به الرياح ولفحته الشمس ليبدو أكبر بوضوح من هذا العمر الزمني. إنها تبدي رجلاً ربما بعمر ثمانين سنة أو أكبر. فعندما كان داروين في السبعين، كان قد بلغ آخر عمره وربما يعود شكله الشائخ بدنياً إلى الكروب والأمراض التي ربما أصيب بها في المناطق المدارية عندما طاف العالم وهو شاب على متن سفينة هير ماجيستيز بيغل *HMS Beagle*. وربما كان مزعوجاً من نقاده العديدين، إضافة إلى تضايقه من عدم قدرته على فهم كيفية توريث الصفات في الكائنات الحية (فعلم الوراثة لم يحظَ بالاعتراف حتى أوائل القرن العشرين عندما أعيد اكتشاف عمل غريغور مندل Gregor Mendel) وخصوصاً أثرت طبيعة الانفجار الكامبري تأثيرا سلبيا عاطفيا وبدنيا في داروين. وكان داروين يكره السجلّ الأحفوري بشكل عام والكامبري بشكل خاص، وقاده الانزعاج من السجل الأحفوري الكامبري إلى لَحَدُه، إذ كان الكامبري وجهله بالآليات الوراثية بالتأكيد أعظم ما تحسّر عليه.

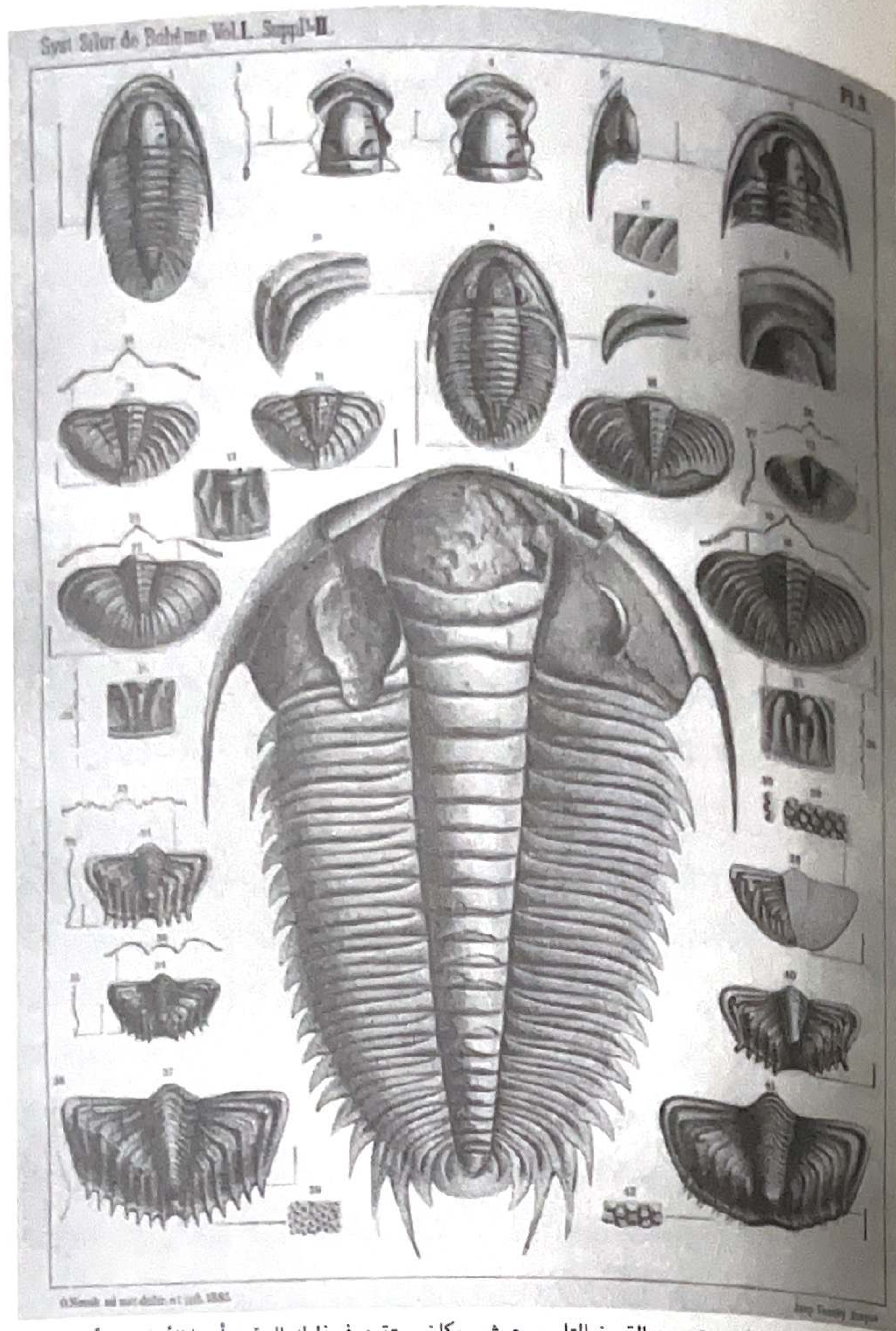
كان من المعروف جيداً قبل زمن داروين بفترة طويلة أن أحافير الحياة الحيوانية تبدو كأنها تظهر فجأة في السجل الأحفوري. وقد حدد عالم الجيولوجيا البريطاني العظيم آدم سجويك Adam Sedgwick، صاحب مصطلح العصر الكامبري وتعريفه، قاعدته عند الطبقات الحاوية لأحافير التريلوبيت (ثلاثية الفصوص) الأولى. وبينما ننظر حاليا إلى شتى العصور الجيولوجية على أنها زمنية، فإنها في الواقع جاءت إلى الوجود كتعاقب طبقات، مع شريحة سفلية معرَّفة بظهور أول لأحفورة ما، وأعلاها معرَّف بانقراض أُحفورة ما، أو أفضل من ذلك، بظهور أنواع أخرى أول مرة. وفي حالتنا كان هذا النظام الكامبري المؤسس استناداً على تراكم الطبقات في ويلز، فالعصر الكامبري هو الوقت الذي تراكمت خلاله تلك الطبقات الكامبرية لا أكثر ولا أقلّ.

لقد وجد سجويك أنه في فواصل طبقية قصيرة توجد صخور رسوبية خالية من الأحافير تعلوها صخور تمتاز بأحافير وفيرة واضحة جدا، وأكثرها شيوعاً التريلوبيت والتريلوبيت هي مفصليات أرجل أحفورية، ومن ثم أحافيرها هي بقايا حيوانات معقدة عالية التطور، وكانت هذه المشاهدة تزعج داروين (وتسعد نُقاده)، إذ بدا أنها تعارض نظرية التطور المطروحة حديثاً حينذاك.[1]

وهكذا ذهب تشارلز داروين إلى قبره وهو يلعن السجل الأحفوري. فقد كان يعرف بفضل عبقريته أنه على حق، لكن هذه المعرفة كان يعكرها نُقاده الذين أشاروا إلى أن الحياة «الأولى» على الأرض كانت معقدة لدرجة لا يعقل معها أن عمليات التطور التي تناولها داروين ببلاغة في إصدارات عديدة من عمله العظيم في أصل الأنواع *On the Origin of Species* يمكن أن تكون قد أنتجت كائنات بتعقيد مثل تعقيد التريلوبيت. والمفارقة العظيمة هي أن التريلوبيت لم تظهر إلا بعد انقضاء نصف العصر الكامبري على الأقل.[2]

كانت التريلوبيت، وهي من أشهر أحافير الكامبري، مفصليات أرجل هيمنت على الموائل Habitats في المحيطات باكراً نسبياً في تاريخ الحيوانات على الأرض. ولكن كم باكراً؟ في وقت داروين، كان يعتقد أن التريلوبيت هي الأبكر بين كل الحيوانات. ومع ذلك، فهي بلا شك معقدة ذات جسم من ثلاثة فصوص وعيون وأطراف معقدة، وهي كبيرة الحجم، وبعض أنواعها الأبكر كان يصل طولها إلى قدمين [61 سم]. وكان يفترض أن الحيوانات الأولى يجب أن يكون شكلها مختلفاً: أن تكون صغيرة ومبسطة لا كبيرة ومعقدة. والآن صرنا نعرف أن التريلوبيت لم تكن الحيوانات الأولى- بل ولا حتى قريبة في الواقع من ذلك.[3]

إن تاريخ نشأة الحيوانات على الأرض واحد من أكثر فصول الحياة سحراً، وفي الوقت نفسه أكثرها إثارة للجدل. وهناك أيضاً قدر كبير من المعلومات الجديدة التي جُمعت في السنوات العشر الماضية. ويوجد خطان اثنان منفصلان من الأدلة يعطيان وجهتي نظر مختلفتين تماماً حول توقيت التنوّع الأول لشعب الحيوانات. وينطلق أحد هذين الخطين من نمط ظهور أحافير الحيوانات في الصخور، والثاني من دراسات الساعة الجزيئية على حيوانات موجودة. ويعطي هذان الخطان مفاتيح مهمة لواحد من أعظم ألغاز علم الأحافير، وهو التنوّع السريع للحيوانات.



شكل توضيحي للتريلوبيت من القرن التاسع عشر، وكان يعتقد في ذلك الوقت أنها الأحافير الأقدم على الأرض. واستخدمت التريلوبيت لوسم بداية العصر الكامبري.

يأتي الخط الكبير الأول من الأدلة حول الانفجار الكامبري من الأحافير، وجاء ظهور الحيوانات التي تركت دليلاً على وجودها في السجل الصخري على أربع موجات متعاقبة، بدأت الأولى منها قبل نحو 575 مليون سنة ودعيت الانفجار الأفالوني Avalon explosion وجاء الاسم من منطقة في شرق كندا حيث عثر على العناصر الأقدم من هذه المجموعة. أما الموجة الثانية؛ فتتزامن مع الاختفاء الكامل تقريباً للإدياكاريات، وقد تميزت ليس بأحافير

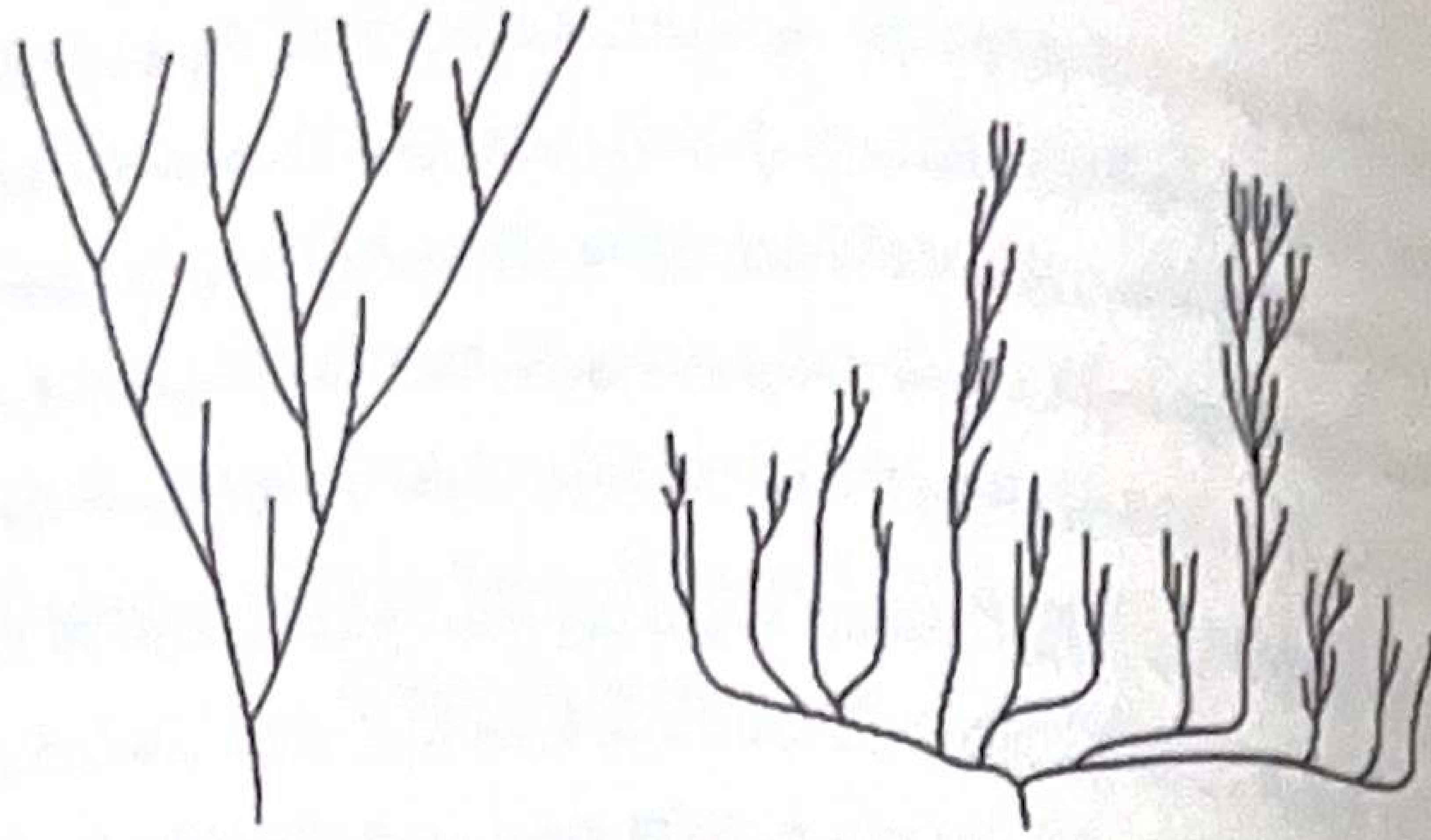
فعلية بل بآثار دقيقة لحركتها. فهذه الأحافير الآثارية العديدة لا يمكن أن تتشكل إلا من خلال حركة نشيطة لكائنات حية متعددة الخلايا، أي الحيوانات. وهذه الأحافير الآثارية يصل عمرها إلى 560 مليون سنة لكن معظمها بعمر نحو 550 مليون سنة. وكانت قيعان البحار تعج بأشكال حياة شبيهة بديدان صغيرة ذات حركة نشيطة.[4]

وكان الاختراق الثالث هو ظهور الهياكل، أعداد ضخمة من عناصر هيكلية صغيرة في طبقات بعمر أقل من 550 مليون سنة، وهي أشواك وقشور من كربونات الكالسيوم يفترض أنها كانت تغطي الحيوانات بمعطف من هذه الهياكل الصغيرة، تقريباً مثل السقف القرميدي. وأخيراً ظهرت الحيوانات المتحجرة الأكبر، بما في ذلك التريلوبيت وعضديات الأرجل الشبيهة بالمحار Clam-like brachiopods وشوكيات الجلد الشائكة Spiny echinoderms وأنواع عديدة من رخويات شبيهة بالحلزون. وكلها في طبقات عمرها أصغر من 530 مليون سنة. ولم تكن الموجات الثلاث الأولى معروفة في أيام داروين. وكان الكامبري محدداً بالظهور الأول للتريلوبيت في الطبقات الرسوبية. وقد تبدو أسباب هذا التتالي أبسط مما هي عليه، وهي أن تراكيز الأكسجين ارتفعت لأعلى مستوياتٍ لها في العالم حتى ذلك الحين.

نعرف اليوم أن هذا التعاقب لإبداعات الحياة الحيوانية ظهر بسرعة نسبياً في السجل الأحفوري. ووسائل التأريخ الجديدة تضع الآن زمن الأحافير المعقدة الأولى (الأحافير الهيكلية الصغيرة، التي هي أصغر عمرا بما بين 20 إلى 10 مليون سنة من الأحافير الآثارية الأولى) عند أقدم بقليل من 540 مليون سنة، في حين ظهرت أوائل التريلوبيت في السجل بعد نحو 20 مليون سنة من ذلك الوقت.

إن ظهور الحيوانات في السجل الأحفوري حدث مهم سُمّي الانفجار الكامبري. أما بالنسبة إلى علماء الأحافير؛ فقد وسم الانفجار الكامبري الظهور الأول لمعظم أضخم شعب الحيوانات التي كانت كبيرة بما يكفي لتترك أثراً في السجل الصخري.

وبالنسبة إلى علماء الوراثة الجزيئية، فقد كان الظهور الأول لمعظم أضخم شعب الحيوانات التي كانت كبيرة بما يكفي لتترك أثراً لها في السجل الصخري، يسم فيه الكامبري التطور الأول للحيوانات. واحتدم الجدال خلال تسعينات القرن العشرين، وجاء الجواب في السنوات الأولى من هذا القرن عندما أكدت دراسات جزيئية حديثة[5] تستخدم تحليلات أكثر تعقيداً بشكل نهائي التاريخَ الأكثر حداثةً لنشأة الحيوانات الذي قال به علماء الأحافير. وهناك توافق الآن على أن الحياة الحيوانية على الأرض لم تظهر قبل 635 مليون سنة،[6] وربما يكون عمرها أقرب إلى 550 مليون سنة.



اليسار: الشكل المخروطي يظهر النموذج التقليدي للتباين المتزايد. اليمين: المخروط المقلوب يمثل التنوُّع والتلاشي.

ويؤرّخ العصر الكامبري الآن بما بين 542 ونحو 495 مليون سنة مضت. (مع أن التاريخ الأخير، لقاعدة الأوردفيشي Ordovician قد يكون أقدم قليلاً). إلا أن معظم شعب الحيوانات ظهرت أول مرة في جزء صغير من هذه الفترة، بين 530 و520 مليون سنة. ويتفق كل المختصين على أن ذلك هو الحدث الثالث أو الرابع من حيث الأهمية في تاريخ الحياة بكاملها، ولا يتفوق عليه في الأهمية إلا الظهور الأول للحياة على الأرض والتكيف مع الأكسجين الجزيئي ونشأة الخلية حقيقية النواة.[7]

وتبعاً لأفضل معلوماتنا الجديدة، كان مستوى الأكسجين بعد بدء الانفجار الكامبري مباشرةً نحو 13 في المئة (مقارنة بـ 21 في المئة اليوم)،[8] لكنه تذبذب بعدئذ. وخلال ذلك الوقت كانت تراكيز ثاني أكسيد الكربون أعلى بكثير على ما هي عليه حاليا، أعلى بمئات المرات، في الحقيقة، ومثل تلك المستويات سبّبت تأثير دفيئة شديداً، وكانت شدته كافية للتغلب على كون الشمس في ذلك الوقت أقلّ شدة مما هي حاليا بنحو خمسة في المئة. وحتى مع هبوط تراكيز ثاني أكسيد الكربون في نهاية هذا العصر، فإن درجات الحرارة بقيت ربما في أعلى مستوياتٍ لها من أي فترة في تاريخ حياة الحيوانات على الأرض. ولما كانت كمية الأكسجين المنحلة في مياه البحار تنخفض بزيادة درجات الحرارة، فإن ظروف نقص الأكسجين الموجودة في المحيطات أساساً ستكون قد تفاقمت.

وقد منحنا الاستعراض الرائع من الأحافير المحفوظة، والتي تظهر بينها على حدّ سواء أحافير أجزائها الصلبة والرخوة من التراكمات المذهلة والمكتشفة حديثاً في منطقة تشينغ جيانغ Chengjiang في الصين، نظرةً جديدة على نشأة شعب الحيوانات على

الأرض وعلى طبيعة الحياة في الكوكب الكامبري قبل التراكم الأكثر شهرة من بين كل التراكمات الأحفورية، ألا وهو طَفَل بيرغِس في كولومبيا البريطانية. معروفٌ حالياً أن طبقات تشينغ جيانغ تراكمت قبل ما بين 520 و515 مليون سنة، في حين يعتقد أن طَفَل بيرغس ليس أقدم من 505 ملايين سنة. وبذلك تعطينا نحو عشرة ملايين سنة التي تفصل بين هذين التراكمين نظرةً جديدة من كيفية تنوع الحيوانات.

ولما كان كل من تشينغ جيانغ وبيرغِس قد يحفظان أجزاء رخوة وكذلك حيوانات ذات هياكل،[9] فقد صارت لدينا صورة جيدة عما كان هناك، من حيث الوفرة النسبية. فمن دون هذه الصورة المكملة بدراسة الأجزاء الرخوة المحفوظة، لما استطعنا أن نكون متأكدين من الوفرة النسبية للأنواع المختلفة من الحيوانات، فلربما كانت هناك وفرة ضخمة من المخلوقات مثل الديدان الرخوة وقناديل البحر وأشكال لم تكن لها هياكل. ومن هنا أتت المفاجأة السارة لما يبدو مظهراً واضحاً لطبيعة الحيوانات في كلا الموقعين. وهناك حالياً أكثر من خمسين ألف أحفورة جُمِعت من طَفَل بيرغِس (وعدد أقل من تشينغ جيانغ). وقد أورد ديرك بريغس ودوغ إروين وفريد كولير في ملخصهم البارع عن حيوانات بيرغِس (في كتابهم الصادر في عام 1994 بعنوان أحافير طَفَل بيرغس[10]) قائمة بما مجموعه 150 نوعاً من الحيوانات. ونصفها تقريباً من مفصليات أرجل أو أشباه مفصليات الأرجل. ولكنّ الرقم الأكثر إثارة للاهتمام يتعلق بعدد الأفراد، إذ إن أكثر من تسعين في المئة من كل الأحافير هي من مفصليات الأرجل، يليها الإسفنج وعضديات الأرجل Brachiopods. فمثلما هي الحال في طبقات تشينغ جيانغ الأبكر، هيمنت مفصليات الأرجل على قاع بحر بيرغِس سواء من حيث أنواع الحيوانات أم أعدادها.

مفصليات الأرجل هي من بين الأكثر تعقيداً من كل اللافقاريات، وعلى الرغم من ذلك، في تلك التراكمات الأحفورية الأبكر تقريباً في زمن الحيوانات، نجد أنها متنوعة وشائعة، وهذا يدل على تطور طويل قبل ظهورها الأول في السجل، ربما كمفصليات أرجل زاحفة على قاع البحار بطول مليمتر (أو أقل من ذلك)، إضافة إلى أنواع عديدة أخرى أكثر منها تسبح أو تطفو في البحر المكشوف نفسه.

ومن المفاجآت الكبيرة لزيارة طَفَل بيرغس (وكلا المؤلفين كان محظوظاً بزيارته) هي إدراك أن الأحافير الأكثر شيوعاً لا تأتي من تلك الأصناف الغريبة العديدة الفاتنة والمخلوقات ذات الأجسام الرخوة التي تملأ صفحات العديد من الكتب المخصصة

لحيوانات Fauna ونباتات Flora طَفَل بيرغِس، بل إن معظم الأحافير تأتي من التريلوبيت، ومفصليات أرجل بأعداد أقلّ لكن متنوعة بشدة، تهيمن على المجتمع في بيرغِس،[11] من حيث أعداده الهائلة من الأفراد والأنواع، وكذلك الأعداد الهائلة من الأنواع المختلفة من مخططات الأجسام التي توصف بمقياس يُدعى التباين Disparity (ويقارن بالتنوع Diversity، الذي يشير إلى عدد الأصناف المختلفة). ويبدو أن مفصليات الأرجل كانت حيوانات الكامبري الأكثر نجاحاً. فإلى أي درجة كان هذا النجاح يعود إلى السمة الأساسية لمخطط أجسامها، أي التقسيم إلى فصوص Segementation؟

الحيوانات المُقسّمة إلى وحدات هي الأكثر تنوعاً من كل الحيوانات على الكوكب، ومعظمها مفصليات أرجل. وتبدي كل مفصليات الأرجل، بما في ذلك الحشرات المتنوعة جداً، وحدات جسم ومناطق جسم متكررة تستند إلى تجميع لأجزاء فردية ذات وظائف نوعية للحيوان. والميزة المشتركة للمجموعة هي وجود هيكل خارجي Exoskeleton متمفصل يحيط بالجسم كله. فهذا الهيكل الخارجي يمتدّ وصولاً إلى القناة الهضمية. والهياكل الخارجية لا تستطيع أن تنمو، ولذلك يتعين عليها أن تنسلخ دورياً وتستبدل بآخر أكبر قليلاً. ويتألف جسمها من رأس متمايز جيداً وجذع ومناطق خلفية بتناسبات مختلفة. وتكون الزوائد Appendages نوعية متخصصة عادة. ففي مفصليات الأرجل الأرضية، فإن الزوائد غالباً مفردة (ضخمة Enormous). أما في الأشكال البحرية بشكل عام يكون؛ فلكل زائدة فرعان أو جزءان: فرع داخلي يتصل بالرجل، وفرع خارجي يتصل بالخيشوم Gill، ولذلك تُسمى ذات الفرعين Biramous. وتغلف الهياكلُ الخارجية الأقسامَ الرخوة مثل درع ولعل هذه وظيفتها الأهم: الحماية. وعواقب مثل هذه الهياكل كبيرة: فلا يمكن أن يكون هناك انتشار سلبي Passive diffusion للأكسجين عبر أي جزء من الجسم. وللحصول على الأكسجين، فقد اضطرت مفصليات الأرجل الأولى، التي كانت كلها بَحَرية، إلى تطوير بنى تنفسية متخصصة - أي الخياشيم. والحيوانات التي ينقسم جسمها إلى أجزاء هي الأكثر تنوعاً بين كل الحيوانات على الكوكب. ومفصليات الأرجل ليست الوحيدة التي تمتاز بمثل هذه الصفة: كل الديدان الحلقية Annelids مُجزّأة في حلقات، وكذلك بعض أعضاء المجموعات غير المُجزّأة عموماً، مثل الرخويات أُحادية الصفيحة Monoplacophoran تُظهر على الأقلّ بعض التجزيء. وظهر التجزيء باكراً في تاريخ الحيوانات، وبالواقع في التريلوبيت من الكامبري نشاهد أن الأحافير الحيوانية الباكرة المحفوظة والأكثر شيوعا تبدي هذه الصفة.

وفي كتابه لعام 2004، نشأة الشُّعب *On the Origin of Phyla*[21]، وينظر المؤلف جيمس فالنتاين James Valentine في اللغز التطوري الكبير: لماذا توجد كل هذه الأعداد والأشكال العديدة جداً من مفصليات الأرجل في الكامبري؟ ويجدر بنا أن ننظر إلى ما كتبه في هذا الموضوع:

> «على الرغم من أن العديد من مفصليات الأرجل الباكرة لم تكن لديها قشرة متمعدنة، فقد ظهر إلى النور تنوّع رائع لأنماط أجسام مفصليات الأرجل الباكرة، وهي كثيرة ومميزة لدرجة أن ذلك يطرح مشكلات مهمة في تطبيق مبادئ التصنيف. فأنماط مفصليات الأرجل المتباينة هذه، محيرة من ناحية منشأ سلالاتها... وهذا الانفجار المفاجئ بشكل جلي لتطور أنماط أجسام شبيهة بمفصليات الأرجل هو انفجار متميز حتى بين أصناف الانفجار الكامبري.»

ويتألف ما ندعوه مفصليات أرجل مما يبدو أنه ربما يكون العديد من المجموعات التي تطورت بشكل مستقل من خلال التطور المُتقارِب Convergent evolution، منتجة مخططات أجسام عظيمة التنوّع، فيما عدا جانب واحد: جميعها لديه زوائد ذات فرعين في كل جزء -طرفٌ يحمل رِجلاً من نوع ما، وطرف ثانٍ عبارة عن خيشوم طويل.

ما الذي دعا المجموعات الحيوانية الأساسية إلى اختيار التجزيء؟ ولعل اختيار هذه الكلمة اختيار خاطئ، إذ يلاحظ فالنتاين وغيره أن مفصليات الأرجل ليست مُجزأة إلى أجزء كثيراً جداً- فالأجزاء في الحلقيات تتكون من حجيرات منفصلة بشكل كبير لكل حلقة من حلقات من الجسم- إنما تمتاز بالتكرار. ويقترح فالنتاين أن يكون مخطط الجسم اللافت هذا ظهر كاستجابة لاحتياجات الحركة، ويقول: «من الواضح أن الطبيعة المُجَزأة لأجسام مفصليات الأرجل ترتبط بآليات حركة الجسم، خصوصا الانتقال، مدعوماً بشبكة الأعصاب والأوعية.» ولا شكَّ في أن هذا النوع من مخطط الجسم هو تكيف مساعد على الحركة. ونتيجة هذا النمط من مخطط الجسم هي السماح لقطع متكررة من الخياشيم، كل منها صغير بما فيه الكفاية لتتموضع بالاتجاه المثالي تحت جزء الجسم. وبهذه الوضعية يمكن أن يتدفق الماء بشكل فاعل فوق الخياشيم ريشية الشكل وعبرها؛ فيزيد توفر جزيئات الأكسجين التي تلامس الخياشيم في كل ثانية، وفق الفرضية التي طرحها بيتر وورد في عام 2006.[13]

والحيوان الآخر الذي نعثر عليه بوفرة في أقدم تراكمات العصر الكامبري هو الإسفنج Sponge. ومثل اللاسعات، ليست لدى الإسفنجيات أجزاء تنفسية، ولا نتوقع أن نراها عندها. وبخطة بناء الجسم حول سلسلة من التجويفات الكيسية الشكل (مثل اللاسعات، لكن مع تنظيم أدنى منها، فلا يوجد أنسجة حقيقية في الإسفنج) تكون لجميع الإسفنجيات مساحة سطح واسعة جداً بالنسبة إلى الحجم. فالإسفنجيات في الواقع هي تكتل من العديد من الكائنات الحية وحيدة الخلية، وكل خلية منها تلامس ماء البحر أساساً. ولكن حتى مع هذه الميزة، فإن لدى الإسفنجيات طريقة أكثر فعالية في كسب الأكسجين. فخلية التغذية الرئيسة لها -تدعى بالخلية القِمْعية (الخلايا المطوقة السوطية) Choanocyte- تدفع بكميات كبيرة من الماء تعبر عبر بنية الجسم. وقد اقترح بعض المتخصصين بالإسفنج أن الإسفنج يمرر ما يصل إل عشرة آلاف ضعف حجمه من ماء البحر عبر جسمه كل يوم. ونتيجة لذلك تكون الإسفنجيات قادرة على العيش في ظروف يكون الأكسجين فيها منخفضا بشدة؛ لأنها فعالة جدا في تحريك أحجام كبيرة من الماء عبر جسمها، حاصلة على أكسجين كافٍ حتى من الماء الذي يحوي القليل منه.

والمجموعات الكبيرة من الحيوانات ذات الأجزاء الصلبة في الكامبري هي بشكل واضح قبيلة مفصليات الأرجل الضخمة، تتبعها من حيث الأهمية العددية (في معظم طبقات الكامبري البحرية) عضديات الأرجل، ثم تأتي شوكيات الجلد والرخويات بأعداد أقلّ. وعضديات الأرجل مجموعة ما زالت على قيد الحياة لها قرابة بالبرايوزوا Bryozoans التي غالباً ما يجري الخلط بينها وبين الرخويات ذات المصراعين. وبينما يوجد تشابه سطحي بين صدفات ذوات المصراعين وعضديات الأرجل، فإن التشريح الداخلي يختلف جذرياً بين المجموعتين. والسمة الكبرى لعضدية الأرجل هي عضو تغذية يُسمى لوفوفور (حامل العرف) Lophophore، يتألف من عروة كبيرة ذات زوائد رفيعة عديدة منتجةً شكلاً رقيقا شبيهاً بالمروحة ضمن الصدفة. ويرشّح هذا العضو ماء البحر للحصول على الطعام؛ ولما كان مملوءا بسوائل الجسم ورقيقا جداً، فإنه يعمل أيضاً كعضو تنفس ممتاز. ويعتقد بعضنا أن عضديات الأرجل مجموعة مأساوية، فبعد أن كانت ربما المجموعة الأكثر شيوعاً من سكان قيعان البحار في حقبة الطلائع القديمة، كاد الانقراض البرمي يُبيدها تماماً منذ نحو 250 مليون سنة ولم تستعد هيمنتها بعدئذ.

وتشكل شوكيات جلد الكامبري تجمعاً غريباً من حيوانات صغيرة صندوقية الشكل، من بين الأبكر من شوكيات الجلد حلزونية الصفائح Helicoplacoid ذات الشكل

المميّز والغريب كمخروط الصنوبر، مع وجود بعض من الإيوكرنوئيات Eocrinoids والأدريوأستيروئيدات Edrioasteroids ذات السويقات البدائية في الرواسب. وكانت الرخويات أكثر شيوعاً من شوكيات الجلد، وكان أغلبها خلال العصر الكامبري صغير الحجم، ونجد جميع الأصناف الكبرى (بطنيات الأرجل Gastropods، ذات المصراعين Bivavlves، رأسيات الأرجل Cephalopods) في طبقات الكامبري. وأكثر الرخويات شيوعاً كانت وحيدة الصفيحة Monoplacophora، وهي طائفة Class صغيرة في أيامنا، لكنها كانت شائعة في الكامبري، وكانت لها صدفة شبيهة بالبطلينوس وجسم شبيه بالحلزون مع قدم عريضة زاحفة. والأمر الأكثر إثارة للاهتمام، أنها كانت الوحيدة من بين الرخويات في ذلك الوقت التي أظهرت تنظيم جسم يوحي بالتجزيء. فمن خلال فحص الندب العضلية على الصدفات الأحفورية، وبمقارنة تشريحها بالأشكال التي ما زالت تعيش حاليا، نعتقد أن ذوات الصفيحة التي عاشت في العصر الكامبري كانت لها خياشيم متعددة. وبطنيات الأرجل في العصر الحديث لها زوج واحد من الخياشيم أو حتى فقط خيشوم وحيد، لكن ذوات الصفيحة في العصر الكامبري التي كان أسلوب معيشتها شبيهاً جداً بالحلزون على الأغلب، وجدت أنه من الضروري أن تمتلك خياشيم متعددة، ويُحتفى بها على أنها الرخوي السلفي الذي سيفضي إلى كل البقية: بطنيات الأرجل، ورأسيات الأرجل، وذوات المصراعين، وعديدات الأصداف (الكيتونات) Chiton، والأصناف الأصغر من الرخويات.

وأدى اكتشاف وحيدة الصفيحة الحية -التي اعتقد طويلاً أنها انقرضت في نهاية البرمي- في أعماق البحار في خمسينات القرن العشرين إلى فهم أعمق بكثير لحياة الرخويات الباكرة. وأكدت الأشكال الحية أن ندب العضلات الموجودة داخل أحافير وحيدة الصفيحة الأبكر، كان لها أكثر من زوج واحد من الخياشيم. وفي الحقيقة، كانت أزواج عديدة من العضلات تبطن كامل طول السطح الداخلي للصدفة؛ مما أدى إلى استنتاج مفاده أن هذه النماذج الباكرة أظهرت تقسيما واضحاً، أو على الأقل تكراراً لنظام الأوعية الدموية والخياشيم. ولما كانت الخياشيم وحدها (وأنظمة دوران الدم والترشيح الداعمة) تظهر هذا الطراز التكراري، فيمكن أن نفترض أنه مثل مفصليات الأرجل كان هذا النمط التكراري تكيفاً لزيادة مساحة السطح التنفسي للخياشيم. وهناك نموذج تكرار مشابه إلى حدّ ما عند عديدات الأصداف التي كثيراً ما تشاهد حاليا على الشواطئ بعد الجزر، ويمتدّ ليشمل حتى الصدفة.

وداخل صدفة عضديات الأرجل، مثلها مثل جسم شوكيات الجلد، يتألف من الماء بالكامل تقريباً، واللحم قليل جداً، وهو بتماس مع تيار ثابت من ماء البحر. ويخلق حامل العرف في عضديات الأرجل تيارات متعددة من ماء البحر التي تعبر جوانب الصدفة، ويتحرك عبر حامل العرف ثم يُدفع خارجاً أمام الصدفة. ولهذا التيار الثابت من الماء الجديد الداخل إلى عضدية الأرجل نفس تأثير التيار العابر عبر الإسفنج. والحجم الصغير من اللحم مقارنةً بمساحة السطح الكبيرة لحامل العرف، إضافة إلى التدفق المستمر للماء (أضعاف عديدة من الحجم الداخلي للصدفة)، يجعل عضدية الأرجل متكيفة بشكل متكامل مع عالم منخفض الأكسجين.

الأحداث الكيميائية والفيزيائية المسببة للانفجار الكامبري

أشرنا سابقاً في هذا الكتاب إلى نشوء تخصصات علمية جديدة كلياً وأبرزها: البيولوجيا الفلكية Astrobiology، والمجال الحليف لها الجيوبيولوجيا Geobiology. لكن حقلاً آخر، شكّل دعامة تقليدية للعلوم البيولوجية بشكل أساسي هو النماء التطوري Evolutionary development، كان قد شهد نهضة كانت عظيمة لدرجة يمكن أن يعتبر معها حقلاً جديداً تقريباً أيضاً. ويدعوه باحثوه الآن اختصارا: إيفوديفو Evodevo، والاكتشافات في هذا الحقل لديها كثير لتقوله في العقد الأخير حول الانفجار الكامبري. وأحد أعظم اختصاصي علم النماء التطوري شون كارول Sean Carroll قدم لنا جولة رائعة في هذا المجال العلمي المنتعش حديثاً في كتابه المنشور في عام 2005 أجمل الأشكال التي لا تحصى *Endless forms most beautiful*.[14] وإذا كان لهذا الكتاب موضوع محوري، فهو أن العلم يمكنه اليوم أن يفهم بشكل أفضل بكثير المشكلات المستعصية سابقاً في البيولوجيا التطورية: أصل الابتكارات التطورية. ولم تستطع المفاهيم التطورية الداروينية التقليدية تفسير حدوث الابتكار التطوري خلال فترات زمنية قصيرة نسبياً. فالاختراقات الجذرية (كظهور الأجنحة، أو الأرجل لليابسة، والتجزيء في مفصليات الأرجل، بل حتى ازدياد الحجم، وهو السمة المميزة للانفجار الكامبري) لا يمكن تفسيرها بالقصص حول الطفرات العديدة والمفاجئة العاملة كلها بانسجام بطريقة ما لتغيير الكائن الحي بشكل جذري. ويبدو الآن أن علم النماء التطوري أعطى حلاً لهذه المعضلة. ويسرد كارول في كتابه أربعة جوانب تستطيع مجتمعة تفسير الابتكار التطوري المفاجئ، وتلخص ببراعة الطريقة الجديدة في شرح حدوث التغيرات الجذرية.

«سر الابتكار» الأول، كما يسميه كارول، هو «العمل مع ما هو موجود مسبقاً». والأمر الجوهري هنا هو المبدأ القائل إن «الطبيعة تعمل كمصلح هاوٍ». لا يحتاج الابتكار دائماً إلى بناء مجموعة معدات جديدة، أو حتى مجموعة جديدة من الأدوات، فما هو موجود بالفعل هو الطريق الأسهل. والسرّان الثاني والثالث كانا معروفين لداروين نفسه وهما: تعدد الوظائف Multifunctionality، والإسهاب المتكرر Redundancy.

ويستخدم تعدد الوظائف Multifunctionality أولاً المورفولوجيا أو الفيسيولوجيا الموجودة مسبقاً لتتولى وظيفة ثانية إضافة إلى تلك التي كانت قد تطورت من أجلها أساساً. أما الإسهاب المتكرر Redundancy؛ فهو عندما تتألف بنية ما ذات وظيفة ما من أقسام متعددة. فإذا أمكن تشغيل أحد تلك الأقسام ليؤدي عملاً جديداً في حين تبقى الأقسام الباقية قادرة على أداء الوظيفة مثل السابق؛ فإنه يوجد لدينا سبيل واضح للابتكار أسهل بكثير من تشكيل مورفولوجيا جديدة بالكامل من الصفر. والسباحة والتنفس عند رأسيات الأرجل مثال على ذلك: رأسيات الأرجل تضخ في العادة كميات كبيرة من الماء عبر خياشيمها وتستخدم، مثل العديد من اللافقاريات، أنابيب منفصلة أو قنوات مخصصة للماء الداخل والماء الخارج، كي لا يعاد استنشاق الماء الفقير بالأكسجين بعد طرحه إلى الخارج. ولكن بتعديلٍ مورفولوجي طفيف على هذا الأنبوب الصادر نحصل على وسيلة جديدة وقديرة للتحرك، يكون التنفس والحركة ممكنين الآن باستخدام المقدار نفسه من الطاقة من خلال الاستفادة من الحجم نفسه من الماء للتنفس والحركة.

السر الأخير هو التصميم من الوحدات النمطية Modularity. فالحيوانات المبنية من أجزاء، مثل مفصليات الأرجل، وإلى حدّ أقلّ نحن الفقاريات، بالفعل نتكون من وحدات. وقد عُدِّلت الأطراف المتفرعة من قطع مفصليات الأرجل بشكل مثير للدهشة لتقوم بوظائف التغذية والتزاوج والتحرك ووظائف أخرى عديدة. ومفصليات الأرجل مثل سكين الجيش السويسري، كل قطعة تحمل أطرافاً تطورت لتؤدي وظيفة نوعية جداً. وينطبق الشيء نفسه على الفقاريات، فأصابعنا عُدِّلت لوظائف متنوعة مثل المشي على الأرض إلى السباحة وإلى الطيران في الهواء، وهو تطور عظيم بالنسبة إلى أصابع اليدين والقدمين البدائية! وأين دور علم النماء التطوري من هذا كله؟ تبيّن أن هذه المورفولوجيات هي المعجون الطري للتغير المورفولوجي، إذ تقوم على نظام من «المفاتيح» الجينية Genetic Switches، تتموضع وفق توزيع جغرافي في الجنين الآخذ بالنمو في المواضع نفسها التي تتموضَع فيها الأطراف المختلفة في مفصليات الأرجل أو في الفقاريات.

المفاتيح هي الأساس هنا، فهي تخبر بأجزاء مختلفة من الجسم أين ومتى عليها أن تنمو. ومن أعظم الاكتشافات أن التتالي الدقيق لمناطق الجسم المختلفة في الحيوان من مفصليات الأرجل من رأسه إلى وسط جسمه إلى بطنه يصطف أولاً على الكروموسومات في النمط الجغرافي نفسه، ومن ثم في الجنين النامي بحدّ ذاته. ويتمّ كثير من هذا بفعل جواهر تاج مملكة النماء التطوري، ألا وهي جينات النمو المورفولوجي Hox genes (الجينات Hox) ومكافئاتها التي أطلقت عليها أسماء أخرى في مجموعات تصنيفية أخرى.

طبقت الاكتشافات الجديدة العديدة لعلم النماء التطوري على الأسئلة العديدة التي تحتاج إلى حلّ حول ذلك اللغز الصميمي في تاريخ الحياة، وهو الانفجار الكامبري، وأهم ما نريد أن نعرفه، وهو توقيت وكيفية نشأة شعب الحيوانات المختلفة ومخططات أجسامها المتباينة التي نراها حاليا.

لقد كانت هناك مدرستان فكريتان لفترة طويلة، الأولى هي أن السجل الأحفوري يعطينا صورة حقيقية لوقت الحدوث الفعلي لتمايز الحيوانات العظيم، أي تباعد الشعب في وقت ما قبل ما بين 550 إلى ربما 600 مليون سنة. والخط الثاني من الأدلة يأتي من مقارنة جينات الأعضاء الموجودين للشعب القديمة، واستخدام مبدأ «الساعة الجزيئية» المذكور سابقاً. والمسألة هي متى حصلت الانقسامات الأكثر أساسية في مملكة الحيوانات، أي الانقسام بين مجموعة من الشعب التي تُسمى أوليات الفم Protostomes وتلك المُسماة ثانويات الفم Deuterostomes. وتفصل بين هاتين المجموعتين الاختلافات التشريحية والنمائية الأساسية في الأجنة.

وتتكون أوليات الفم من مفصليات الأرجل والرخويات والحلقيات Annelids وغيرها، والتي تتميز بالأجنة التي يتشكل عندها - عندما تتطور وتنمو بعد الإخصاب - فم من الفتحة المركزية في البرقة النامية التي تُدعى ثقب البلاستيولا Blastopore. وفي ثانويات الفم (شوكيات الجلد، ونحن الفقاريات، وعدد من شعبٍ أصغر) يبقى الفم وثقب البلاستيولا منفصلين. وتوجد مجموعة ثالثة، هي الشعبة البدائية جداً التي انفصلت من الجذع الأساسي من تطور الحيوانات قبل الانقسام العظيم بين أوليات الفم وثانويات الفم. وتتضمن هذه المجموعة اللاسعات والإسفنجيات وغيرها من شعبٍ أصغر شبيهة بقناديل البحر.

وأول ما ظهر من الحيوانات كانت الأشكال الأبسط، اللاسعات والإسفنجيات المُمثلة، كما قد رأينا، في التجمعات الإدياكارية لما يزيد على 570 مليون سنة مضت، في الفترة الزمنية قبل العصر الكامبري (الذي بدأ قبل 542 مليون سنة)، ولكن أوليات الفم وثانويات الفم المؤكدة لم تشاهد إلا بعد مضي فترة قصيرة من العصر الكامبري نفسه.

وإذا انفصلت أوليات الفم وثانويات الفم، فماذا كان شكل الحيوان الأخير قبل ذلك الانفصال؟ تشير خطوط عديدة من الأدلة إلى أن هذا المخلوق كان ذا تناظر ثنائي الجانب وكان قادراً على التحرك. ويتخيل العديد ممن يدرسون تلك الأوقات وحيواناتها هذا السلفَ الأخيرَ لكل من أوليات الفم وثانويات الفم على شكل دودة صغيرة غير مميزة، ربما مثل بلاناريا *Planaria* العصر الحديث، أو الدودة الإسطوانية Nematoda الصغيرة الموجودة في أيامنا. ولكنّ واحداً من الاكتشافات الجديدة العظيمة هو أن هذا العنصر الأخير من الجذع غير المنقسم بعد، كانت له بالفعل أدوات جينية تسمح له بأن يبدأ هندسة جديدة جذرية، وكانت هذه الأدوات موجودة عنده مدة خمسين مليون سنة على الأقل قبل أن يبدأ باستخدامها! وكان لهذه الدودة فمٌ في المقدمة وشرج في المؤخرة وجهاز هضمي أنبوبي الشكل بينهما. وربما امتلكت نتوءات قصيرة وغليظة تخرج من جانبها، ربما للمعلومات الحسية (الإحساس اللمسي والكيميائي؟). فاللغز هنا هو أن كل هذا كان مجهزاً بطريقة تسمح بحدوث التحول السريع الذي حدث فعلاً. وهذا أمر جديد: كل الأدوات والمميزات اللازمة للانفجار الكامبري بقيت تنتظر قرابة خمسين مليون سنة.

وكما أشرنا سابقا، تُؤرَّخ قاعدة الكامبري الآن بنحو 542 مليون سنة مضت. فقد عُرِّفت قاعدة العصر كمكان من الصخور حيث اكتشفت آثار التحرك الأولى القابلة للتمييز في الطبقات، أي نوع مؤكد من أحافير آثارية تبين أن الحيوانات - حيوانات متحركة - كانت موجودة وتستطيع حفر جحور عمودية في الطين. ومع ذلك، خلال 15 مليون السنة التالية، يبدو أنه كان هناك القليل من تشكل مخططات جسم جديدة أساساً، أو على الأقل لم نستطع أن نجد دليلاً عليها في السجل الأحفوري. وتأتي الإشارة الأولى الحقيقية إلى أن تنوُّعاً كبيراً قد جرى من رسوبيات أحفورية مذهلة اكتشفت مؤخراً فقط في تشينغ جيانغ بالصين،[15] يبلغ عمرها ما بين 520 و 525 مليون سنة، وقد ذكرناها سابقا. وهي نسخة أقدم من طَفَل بيرغِس وتحوى أجزاء رخوة محفوظة.

تسود مفصليات الأرجل في حيوانات كل من تشينغ جيانغ وطَفَل بيرغِس، فهناك العديد والعديد من أنواع مختلفة من مفصليات الأرجل، التي سرعان ما أصبحت الحيوانات الأكثر تنوعاً على الأرض، وقد بقيت على هذا النحو منذ ذلك الحين وحتى الآن. وهناك تقديرات مفادها أنه في عالمنا المعاصر هناك ربما ما يصل إلى ثلاثين مليون نوع منفصل من الخنافس وحدها!

ويخبرنا علم النماء التطوري عن السبب: من بين جميع مخططات الأجسام، لا يمكن لأي منها أن يتغير بشكل سهل جدا وسريع وجذري مثل مفصليات الأرجل. والأسباب هي تماماً تلك التي سردها كارول سابقا: تتألف مفصليات الأرجل من وحدات نمطية، ولها مورفولوجيا مسهبة التكرار يمكن توظيفها في أداء وظائف جديدة، ولديها سلسلة من جينات النمو المورفولوجي Hox genes التي تسمح بتحول سهل لمناطق نوعية في مخطط الجسم العام المتآلف من أجزاء من بدايته إلى نهايته.

كانت النظرة القديمة أن حيوانات جديدة تعني أن هناك جينات جديدة لابدّ من أنها جاءت إلى الوجود. فهناك منطق سليم في هذا، فبشكل مؤكد سيكون عند الإسفنج أو قنديل البحر البدائي جينات أقلّ من مفصليات الأرجل الأكثر تعقيداً: وافتُرض أن السلف المشترك لكل مجموعات مفصليات الأرجل أضاف بطريقة ما جيناتٍ جديدةً، وهي جينات Hox جديدة، أي تلك التي تؤدي دور مفاتيح التحويل؛ والتي تخبر الأقسام المختلفة من الجسم كيف ومتى يجب أن تتشكل. ولكن الأمر كان غير ذلك، إذ بيّن كارول وغيره أن السلف المشترك الأخير لمفصليات الأرجل لم يطور جينات جديدة؛ فقد كانت هذه الجينات موجودة لديه، والتنوّع المذهل التالي لأنواع عديدة جداً من مفصليات الأرجل حدث بجينات موجودة. فكما صاغ كارول ذلك: «إن تطور الأشكال لا يتوقف كثيراً على الجينات الموجودة لديك، بل على كيفية استخدامك لها».

لم يلزم سوى عشرة جينات Hox مختلفة لتغيير وتنوُّع مفصليات الأرجل بالكامل. واكتُشف سرها بمقارنة توزع منتج جينات النمو المورفولوجي -البروتينات النوعية لجينات Hox محددة، وأين يمكن أن يعثر على هذه البروتينات في الجنين النامي. فالفكرة القديمة أن جينا ما أو أكثر عند كائن مفصلي أرجل شفَّرت لبناء رجل هي فكرة خطأ. وتصنع الجينات Hox بروتينات. وتصبح هذه البروتينات عندها الوسائل لبداية وإيقاف نمو مناطق خاصة للجنين النامي. وبعض من هذه البروتينات مَعنيَّة بصنع أنواع محددة

من الملحقات. وإذا نقلت بروتينات الجينات Hox تلك بطريقة ما إلى مواضع جغرافية مختلفة في الجنين النامي؛ فسينتقل المنتج الذي يتم إنتاجه كذلك. وبهذه الطريقة ستوجد الرجل التي كانت سابقاً في جزء ما من الجسم فجأة في موضع جديد كلياً -ولكن، هذا إذا انتقل بروتين الجين Hox بطريقة ما إلى المكان ذي الصلة في الجنين قبل وقت طويل من تشكله. وجاء الابتكار من إزاحة الأماكن أو المناطق الجغرافية في الجنين التي يمكن العثور فيها على بروتين معين من بروتينات الجين Hox.

وقد أدى انزياح مناطق الجينات Hox في أجنة مفصليات الأرجل إلى أنواع مختلفة عديدة من مفصليات الأرجل التي نراها. وتوجد الآن الآلاف، وربما الملايين من الأنواع المختلفة من مورفولوجيات مفصليات الأرجل، وكل هذا التطور حصل باستخدام مجموعة الأدوات نفسها التي تتألف من عشرة جينات. ومفصليات الأرجل لا تساوي شيئاً لولا مخططات أجسامها ذات الأجزاء المتكررة. ويتطلب تخصّص Specialization هذه الأجزاء أن يقع كل واحد منها في منطقة مستقلة من مناطق الجين Hox.

ستيفن غولد مقابل سايمون كونواي موريس: شكل التباين

ما أكثر الأفكار حول أسباب حصول الانفجار الكامبري أساساً. وتبدو أحداث الماضي أحياناً كما لو أنها لا يمكن أن تكون إلا كما وقعت. ولكن لماذا لم يحصل تشكل طويل بطيء لشعب الحيوانات العديدة بدلاً من حدوث ذلك في تلك الفترة المضغوطة ظاهرياً التي نراها؟ وما مدى التنوع بين أهم اللاعبين في مملكة الحيوانات خلال الانفجار الكامبري؟ ظهرت كل الشعب الحيوانية الحالية (عددها نحو اثنتين وثلاثين حتى وإن كان بقدر من الخلاف حول ذلك) لأول مرة في الانفجار الكامبري. وما يثير الدهشة أنه لم يظهر في العالم أي شعبة حيوانية جديدة منذ ذلك الحين، حتى بعد الانقراض البرمي المدمر منذ 252 مليون سنة. ولكن هل كان عدد الشعب في الكامبري أكثر بكثير من الآن؟ وهل كان هناك في الكامبري عدد من أشكال الحيوانات الغريبة المختلفة جوهرياً أكثر منها الآن؟ هذه قضية خلافية جداً بلغت ذروتها في مشاحنة حادة[16] في أواخر تسعينات القرن العشرين بين عالم التطور العظيم الراحل ستيفن جاي غولد Stephen Jay Gould وسايمون كونواي موريس Simon Conway Morris من جامعة كيمبردج الذي ظلّ حتى الآن أكثر علماء الأحافير بريطانيا تبجيلا.

أكد غولد في كتابه الحياة الرائعة Wonderful Life أن الكامبري كانت تملؤه «عجائب غريبة» عرّفها بأنها مخططات جسم لم تعد موجودة على الأرض. وكان يرى أن الانفجار الكامبري كان تحديداً انفجاراً في أنماط الأجسام ومخططات الأجسام وأعداد الأنواع الجديدة. ولو تلاعبنا بهذا المجاز قليلاً؛ لكانت معظم الانفجارات قاتلة. وفي الحقيقة، فإن العديد من الأشكال الجديدة من مخططات الأجسام - أي أشكال جديدة من الشعب من وجهة نظر غولد - لم تنجح في اجتياز الكامبري، إذ قتلها الانفجار، حتى وإن لم يكن ذلك بالمعنى الحرفي؛ فالتأثيرات المترتبة على الزيادة الكبيرة في أشكال الحيوانات قتلتها بفعل التنافس. وبوجود مخططات أجسام عديدة جداً لا يجتاز إلا بعضها الامتحان بالانتخاب الطبيعي Natural Selection. ورأي غولد هو أن التنوع في مخططات الأجسام يمكن نمذجته على شكل هرم، والتنوّع العظيم في مخططات الأجسام كان سريعا، مولدا قاعدة عريضة لهرم من أعداد من مخططات الأجسام - تعرف هذه الظاهرة بالتباين Disparity (التنوّع في مخطط الجسم وليس الأنواع). ومع تقدم العصر الكامبري تقلصت تلك القاعدة حتى بقي عدد أقلّ بكثير من الشعب في نهاية الكامبري مقارنة بما كان موجودا بعد فترة وجيزة من بدايته.

إلا أن كثيرين لم يوافقوا على أن التباين، في الواقع، قد ازداد منذ الكامبري، وكان سايمون كونواي موريس المؤيد الرئيس للرأي الذي يناقض مباشرة رأي ستيفن غولد. فمن وجهة نظر موريس، فإن العجائب الغريبة لم تكن شُعَباً منفصلة على الإطلاق، بل فقط عناصر باكرة لا يمكن التعرف عليها بعد من شعب معروفة جيداً وما زالت حية. وقد استقر الإجماع في الرأي منذ ذلك الجدال في نهاية القرن العشرين -الذي احتدم إلى مستويات غير لائقة بين العلماء- على أن غولد كان مخطئاً على الأغلب، وليست لدينا حجج نضيفها إلى هذا النقاش. ولكن، إذا كانت نيران ذلك السجال قد هدأت ولم يبق منها إلا الجمر، فلا تزال جوانب أخرى من الانفجار الكامبري مطروحة على الجبهات المتقدمة من العلم، وأفضل العلم هو العلم المثير للجدل.

التأريخ الجديد للانفجار الكامبري

كان الانفجار الكامبري بكل تأكيد من أهم الأحداث الكبرى في تاريخ الحياة، كما بقي حتى الوقت الأخير الأكثر غموضاً بين هذه الأحداث. وجاء كثير من عدم اليقين من التأريخ، وبالأحرى من غياب التأريخ، أو على الأقلّ الغياب التام للدقة فيه، وكلما كانت

الصخور أقدم تزايد لعدم اليقين. فعندما حدد آدم سجويك قاعدة الكامبري في أوائل القرن الثامن عشر لأول مرة على أنها الطبقات التي تحوي أوائل التريلوبيت، لم يكن يتصور أن زملاءه سيتاح لهم يوماً ما تأريخ العمر الفعلي بالسنوات، لا بالظهور النسبي للأحافير (لكننا متأكدون من أنه لابد قد حلم بهذه الإمكانية). وبقي التأريخ الدقيق لقاعدة الكامبري خير مثال على ذلك طوال مئتي سنة. وكانت المشكلة الكبرى أنه لم يجر تعريفها يوماً، لا من الناحية البيولوجية ولا من ناحية السجل الصخري الفعلي، وكانت نقاط المعايرة المؤرخة عددياً قليلة ومتباعدة. وعلى خلاف أحداث الانقراضات الجماعية أو الابتكارات البيولوجية الأخرى، لم تكن للتشعب الكامبري نقطة بداية واضحة مُعيّنة معرفة جيداً. واختير بدلاً من ذلك التعريف العالمي للمصطلحات من قبل لجنة خاصة من مختصين دوليين نظمتها **اليونسكو** تحت رعاية البرنامج الدولي للمضاهاة الجيولوجية International Geological Correlation Program (المؤلف المشارك كيرشفينك كان عضواً مُصوّتاً في هذه اللجنة).

وكان موضوع النقاش هو الموقع الفعلي للحد – مهما كان الحد المختار – وكيفية تأريخه. و في أثناء ستينات القرن العشرين وسبعيناته تفاوتت التخمينات (لأنها لم تكن في ذلك الحين إلا تخمينات) عن وقت حدوث الانفجار الكامبري، بين أكثر من 600 مليون سنة مضت إلى أقل من 500 مليون سنة مضت. ولم يكن التقدم ممكناً إلا بعد تطوير تقنيات التأريخ بالنظائر المُشعّة Radiometric dating الحساسة والدقيقة بشكل يفوق التصور. وكانت مشكلة التأريخ أن طريقة التأريخ بالنظائر المشعة تتطلب صخوراً بركانية متعاقبة مع الطبقات الرسوبية على شكل رماد، لأن المطلوب هو الرماد البركاني، وليس أي رماد بركاني بل ذاك الذي يحوي معدن الزركون Zircon (الذي يحتجز نسبة اليورانيوم إلى الرصاص؛ فيشكل ساعات جيولوجية جميلة). ولم تكن مثل هذه الطبقات ذات المواصفات المطلوبة معروفة في أي من صخور بعمر الكامبري في جميع أنحاء العالم.

حاول العالِم الأسترالي البارز في التأريخ الجيولوجي ويليام كومبستون William Copmston (من الجامعة الوطنية الأسترالية بكانبيرا) أن يجرب طريقة أخرى، فطوّر طريقة في أواسط القرن العشرين مستخدماً نظائر الروبيديوم والسترونتيوم -Rubidium Strontium isotopes في الطَفَل (صخور رسوبية غير بركانية) التي أعطت تقديرات عمر قدرها 610 ملايين سنة لأول تريلوبيت في الصين. نعرف الآن أن هذه الطريقة كانت خطأ تماماً، وأن الطرق السليمة هي المرتكزة على التأريخ بواسطة نسبة نظائر

اليورانيوم إلى الرصاص في معدن الزركون. ومع ذلك، فحتى ثمانينات القرن العشرين بقي التأريخ «الرسمي» لقاعدة الكامبري 570 مليون سنة مضت، ولا يزال هذا التأريخ يصادف أحياناً في توليفات عديدة لمقياس الزمن الجيولوجي على الإنترنت وفي الكتب.

ولكن المشكلة الثانية – ليست زمن البداية، بل تحديد ما هي أول أو آخر تجلٍّ لأحفورة معينة التي يتعين استخدامها لتحديد قاعدة الكامبري – كانت مستعصية أكثر من الأولى. وكما ذكرنا سابقا، بحلول ستينات القرن العشرين كان علماء الأحافير قد حسّنوا أساليب ومعدات الجمع، فتبين أكثر وأكثر أن جزءاً كبيراً من تطور الحيوانات، بما في ذلك الحيوانات ذات الأقسام الصلبة التي يمكن أن تتحجر وتحجرت فعلاً، قد سبقت تاريخ التريلوبيت بفترات كبيرة من الزمن. فأحافير الأقسام الصلبة الأقدم في الطبقات تحت تلك الحاوية على التريلوبيت كانت أجزاءً صغيرة لكنها واضحة من الأصداف (ما يُسمى «الأحافير الصدفية الصغيرة»). وكان بعضها يشبه أشواكاً دقيقة وبعضها الآخر أصداف حلزون صغيرة وبعضها ببساطة كسراتٍ من شيء يشبه درعاً من بعض الرخويات وشوكيات الجلد القديمة. فالسؤال كان عن أعمار تشكلها ووجودها الفعلي.

وفي أوائل تسعينات القرن العشرين توصلنا أخيراً إلى اتفاق دولي.[17] ومن بين الأطوار الأربعة المعروفة من السجل الاحفوري لظهور الحيوانات استبعد ممثلي الطور الأول، وهو الإدياكاريات، من العصر الكامبري تماماً. وأعطي ذلك الزمن اسماً خاصاً به، العصر الإدياكاري المعرّف حديثاً ضمن دهر الطلائع. وعُرِّفت قاعدة النظام الكامبري على أنها الطبقات الأدنى التي تحوي أحافير آثارية لحفر الجحور العمودية، التي تسبق بذلك تاريخ الطبقات المتعاقبة مع أحافير صدفية صغيرة، والتي بدورها تعلوها الطبقات مع التريلوبيت. ويعتقد أن القدرة على حفر الجحور عمودياً عبر الرسوبيات يدلّ بشكل ضمني على وجود هيكل هيدروستاتيكي واتصالات عصبية عضلية للتحكم فيه. وهذا الأفق كان أقدم بنحو عشرين مليون سنة من الانفجار الكامبري الفعلي (كما هو مسجل في السجل الأحفوري نفسه). ولكنْ حتى بعد أن تم الاتفاق أخيراً، بقيت تواريخُ ترسب هذه الطبقات مجهولةً.

وفي غياب التأريخ الموثوق به بالنظائر المشعة كان امتداد هذه الفترة، بين أقدم أحافير الحيوانات القابلة للاكتشاف وأول ظهور للتريلوبيت، يصل (في بعض المناطق) إلى عشرات الآلاف من الأمتار من الطبقات بين الإدياكاريات والتريلوبيت، وهذا يشير إلى أن عشرات

الملايين من السنوات التي فصلت بينها – لكن مطيافات الكتلة Mass spectrometers من حقبة الثمانينات (الأدوات التي تستطيع تحديد العمر من الصخور) – كانت تحتاج إلى أعداد كبيرة من الزركون لتجري التحليل بشكل صحيح. إلا أن التكنولوجيا تقدمت، وفي أواخر الثمانينات بدأ استخدام أدوات جديدة أفضل في الآفاق البركانية النادرة لكن الحاسمة التي يمكن العثور عليها أحياناً في الطبقات الرسوبية التي يعتقد أنها كامبرية العمر. وأحد هذه المواضع -المكتشف بعد فترة طويلة من رحيل سجويك وكل معاصريه إلى السجل الأحفوري العظيم- كان في جبال الأطلس الصغير في المغرب، وهناك كان حجر رشيد المحتمل لتحديد عمر المشاهد الأربعة لمسرحية الانفجار الكامبري.

اختراق العمر ومفاجأة العمر

في أواخر الثمانينات جَمَعَ المؤلف المشارك كيرشفينك عينات من الرماد البركاني من جبال الأطلس الصغير من المغرب. فقد وقعت طبقة الرماد هذه تحت الموقع الأول للتريلوبيت الكامبري بنحو خمسين متراً في هذه الكومة العظيمة من الطبقات الرسوبية. فكم من الوقت استغرق ترسب تلك الخمسين متراً الحرجة من الطبقات تحت الماء؟ للأسف، لم يكن هذا الرماد البركاني يحتوي إلا على كمية صغيرة من حبيبات الزركون، وكانت ضئيلة جدا لاستخدامها في التأريخ بالطرق المتعارف عليها في ذلك الوقت. إلا أن كومبستون كان قد طوّر بحلول ذلك الوقت أداةً مدهشةً عرفت بالمسبار الميكروي الأيوني مفرط الدقة العالية Super-High-Resolution Ion Microprobe (SHRIMP) التي كانت قادرة على تركيز حزمة متوازية من أيونات السيزيوم على بقعة صغيرة من حبيبة معدنية. وتلقَّمَ البلازما الناتجة من هذه العملية إلى مطياف الكتلة، ومع بضع مناورات دقيقة كان قادراً على إنتاج تأريخ عالي الدقة لأقصى حدّ بتحليل نظائر اليورانيوم والرصاص.

وكانت النتيجة مذهلة، فقد كانت التواريخ المستنتجة من عينات المغرب تعود إلى نحو 520 مليون سنة، بدلاً من أن تكون أقدم من 600 مليون سنة![18] وفعل كومبستون كل ما بوسعه في محاولة لجعل العمر أقدم، لكن محاولاته لم تفلح. وكان هناك على الأقل ثمانون مليون سنة خطأ في عمر قاعدة الكامبري، وهذا يعني أن الانفجار الكامبري – على الأقلّ ذلك التنوّع الهائل لشُعب الحيوانات التي تشاهد عند

أول ظهور للأحافير الصدفية – كان أشبه بانفجار نووي، أسرع بخمس وعشرين مرة على الأقل من المتوقع. ووجدت فرق بحثية أخرى من معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا (سام بورينغ Sam Bowring) وغيرها النتائجَ نفسها باستخدام رماد بركاني إضافي من المغرب، فضلاً عن أماكن غريبة أخرى مثل ناميبيا والجزء الشمالي من هضبة أنابار في سيبيريا.[19] وصار لدينا الآن تاريخ لظهور التريلوبيت، وكان أصغر عمراً بكثير مما افترض سابقاً. وقد ذُعر علماء الأحافير المسؤولون عن اختيار قاعدة رسمية للكامبري عندما ظنوا أن الكامبري كله ستكون مدته عشرة ملايين سنة فقط؛ لذا تخلوا عن أوائل التريلوبيت كدليل لهم واختاروا حدثاً أقدم، أول أحفورة آثارية تحفر جحوراً، وتلك تمت معايرة عمرها في نهاية المطاف عند نحو 542 مليون سنة مضت.

تبيّن أن تلك الفترة غير العادية من النشاط والابتكار التطوري تتسم أيضاً ببعض الملامح الأخرى غير العادية، إذ أظهرت دراسات نظائر الكربون عبر الحدود بين الكامبري والطلائع أنه جرت في ذلك الزمن أمور غريبة إلى حدّ بعيد، وهي تذبذبات استمرت من مئات آلاف السنين إلى ملايين السنين (سُميت الآن دورات الكربون الكامبرية Cambrian Carbon Cycles).[20] وحجم تلك التذبذبات رهيب، إذ يعادل طحن وحرق كل الكتلة الحيوية الموجودة على الأرض كل بضعة ملايين سنة. وربما سبّب هذا العامل أو عامل ما غيره انطلاقَ الكربون الخفيف جداً (الموجود في الميثان) إلى الغلاف الجوي على نطاق واسع مع كل تأثيرات الدفيئة المرافقة. فهل مرت الأرض عبر تعاقبِ أحداثٍ احترار قصيرة الطور؟ الاحترار الخفيف يمكنه بالفعل زيادة التنوُّع البيولوجي عبر تقصير طور الجيل، وهذا التأثير يشاهَد في الكائنات الحية الكائنات الحية المعاصرة. أما الاحترار المفرط؛ فيمكن بالطبع أن يكون قاتلاً.

وهناك أمر غريب آخر هو أن الكامبري يشتهر منذ وقت طويل بحركة ما كبيرة جدا في الصفائح التكتونية Tectonic plates (الصفائح هي ألواح صخمة من القشرة الأرضية التي تكوّن سطح الأرض والتي تتحرك وتتباعد وتتصادم مع الصفائح التكتونية الأرضية الأخرى). ويمكن تتبع هذه الحركات باستخدام طريقة تُسمى المغناطيسية القديمة (أو الباليومغناطيسية) Paleomagnetism، والتي تستطيع تحديد خط العرض القديم للصخور وكذلك اتجاهات حركة الصفائح. وقد أثبت المؤلف المشارك كيرشفينك أول مرة أطوار أرض كرة الثلج الموصوفة في الفصول السابقة باستخدام هذه الأداة تحديداً. وتبيّن التحليلات الباليومغناطيسية الجديدة

مـن مختبرات باليومغناطيسـية عديدة شـيئاً يبدو مسـتحيلاً: إن القـارات كانت تعبر علـى سـطح الأرض بسرعـة كبـيرة، أو إن الكرة الأرضية كلها كانـت تتحرك بسرعة تحت قطبيْ دورانهـا. وقـد بقـي القطـب الشـمالي والقطـب الجنـوبي في مكانيهـما الدائمين وكان العـالم تحتهـما يتحرك.

مصدر هذه المعلومات عينات أخذت من أستراليا، وتشير، على سبيل المثال، إلى أن هذه القارة، بينما كانت على جانبي خط الاستواء، دارت باتجاه عقارب الساعة سبعين درجة تقريباً بين بداية الكامبري ونهايته، أي في أقلّ من عشرة ملايين سنة، أو ربما خلال زمن أقصر بكثير. ولما كانت أستراليا جزءاً من القارة الفائقة غوندوانا التي كانت تشمل أنتاركتيكا (القارة القطبية الجنوبية) والهند الكبرى ومدغشقر وإفريقيا وأمريكا الجنوبية، فلابدّ أن هذا الدوران شمل أكثر من نصف الكتلة القارية آنذاك. وتظهر معلومات من كامل غوندوانا قصة مشابهة، أنها كانت تدور عكس عقارب الساعة خلال فترة الانفجار الكامبري، قبل ما بين 530 إلى 520 مليون سنة تحديداً. وأشارت نتائج مشابهة من قارة أمريكا الشمالية الكبيرة المدعوة لورنتيا Laurentia إلى أنها تحركت من القطب الجنوبي القارس شمالاً حتى خط الاستواء في الوقت نفسه عملياً.

وفي هذه المرحلة تجلّى إله البساطة؛ فربما لم تكن مجموعة من الصفائح التكتونية الصغيرة هي التي تتحرك، بل تحرك كل شيء على سطح الكرة الأرضية معاً بالنسبة إلى محور الدوران. ولكن هذا غير ممكن إلا إذا كانت لورنتيا وأستراليا تبعد إحداهما عن الأخرى نحو تسعين درجة في ذلك الوقت (وهذا يمكن أن يكون صحيحاً لو كانت أستراليا على خط الاستواء ولورنتيا في القطب!). في الواقع، فرضية الدورة الوحيدة هذه تقدم توقعات نوعية جداً حول التوجه والتوزع النسبي لكل كتل اليابسة القارية، «الباليوجغرافيا (الجغرافيا القديمة) المطلقة». ومع الاعتذار من تولكين، «حركة واحدة تحركهم جميعهم، دورة واحدة تُديرُهم، نقلةٌ واحدة من القطب، وعلى الكوكب سنجدهم!» دورة بسيطة واحدة لكل الأرض الصلبة حول محور الدوران جمع نحو تسعين في المئة من نتائج المغناطيسية القديمة المبعثرة سابقاً في بؤرة واضحة.

وكل شيء كان يحدث في الوقت نفسه. ونبضة كبيرة من التطور، سواء في عدد الأنواع أو في مخططات الأجسام، وزيادة هائلة في التمعدن الحيوي Biomineralization (أي في أعداد الهياكل الخارجية وشتى أشكالها التي تطورت عند شعب مختلفة عديدة)، والتفاعلات الأولى بين المفترس والفريسة بين الحيوانات، وتقلبات ضخمة في ميزانيات الكربون العضوي، والتذبذبات الهائجة في مواضع القارات؛ وكل هذا جعل العلماء بما في ذلك كيرشفينك وطلابه يتساءلون عما إذا كان ذلك مصادفة أم علاقة سببية Casue and effect.

ومع التراكم المتزايد للأدلة عن المغناطيسية القديمة، اكُشفت حركاتٌ في الصفائح القديمة (مع قاراتها المدفونة المثبتة في القشرة الأرضية) لم تكن مفاجئة فحسب بل مستحيلة بكل ما في الكلمة من معنى. وتقول نظرية الوتيرة الواحدة Uniformitarianis إن علينا استخدام المعاصر لفهم الماضي، ويسهل علينا اليوم قياس سرعة تحرك الصفائح في الحاضر. ففي المحيط الأطلسي، حيث تتشكل القشرة المحيطية الجديدة على طول حيد منتصف الأطلسي Mid-Atlantic Ridge، تتباعد الصفيحتان المشكلتان لجانبي المحيط الأطلسي الشمالي والجنوبي عن مصدرها المحوري ببطء، نحو بوصة واحدة (2.5 سم) في السنة فقط. وهذه الصفائح الهائلة، وهي تنشأ في مراكز التباعد في المحيطات، تمسك القارات في حضنها الحجري، بحيث تذهب القارات في كل مكان تذهب إليه الصفائح. وتختلف سرعات التباعد، فمثلاً، تشاهد اليوم سرعات أعلى بكثير في الصفائح التي تنشأ في منطقة المحيط الهادي، حيث تصل إلى ثلاث إلى خمس بوصات [7.5-12.5 سم] في السنة. وتقترب أعلى سرعة ممكنة من عشر بوصات [25 سم] في السنة، لكن حتى هذه السرعة نظرية ومثيرة للجدل. إلا أن بيانات المغناطيسية القديمة كانت تعطي سرعات بلغت عدة أقدام في السنة: وهذا لا يمكن تفسيره بتأثيرات تكتونية الصفائح وحدها. فالبيانات قابلة للتكرار [يتكرر الوصول إليها من قبل أبحاث مستقلة] ومتناسقة. وهذا يشير إلى وقوع شيء ثوري، أو على الأقلّ شيء يختلف عن العمليات المعاصرة لدرجة مدهشة جداً للعلماء. وهذا أكثر مما يمكن أن يتحمله مبدأ الوتيرة الواحدة!

وأول ردة فعل على مشاهدة هذه البيانات التي تشير إلى مثل تلك الحركة السريعة لسطح الأرض كانت الشك في حقيقة البيانات، وهي ردة فعل مبررة تماماً؛ فكما قال كارل ساغان يوماً: الادعاءات (العلمية) الاستثنائية تتطلب براهين استثنائية. وكانت حركات القارات سريعة لدرجة مفادها أن حركات تكتونية الصفائح الطبيعية المذكورة سابقا، أي نموذجياً بضع بوصات في السنة على الأكثر، لا تستطيع تفسيرها. وكانت البيانات الجديدة التي بقيت تنتجها أبحاث كيرشفينك وبضعة باحثين آخرين ببطء وفي الوقت نفسه بثبات، تبيّن أن الصفائح كانت تتحرك أسرع بكثير مما تسمح به النظرية التقليدية

لتكتونية الصفائح. وفضلاً عن كل ذلك، فمعظم هذه الحركة تصادفت بدقة مع الزيادة الانفجارية في التنوُّع في شعب الحيوانات. فإذا لم تكن تلك الحدثيات ناجمة عن تكتونية الصفائح، فماذا يمكن أن يكون سببها؟ وكيف يمكن أن يؤثر ذلك في تطور الحيوانات؟

كان الجواب مفاجئاً، مع أنه يفترض أن يكون متوقعاً، إذ من المعروف أن عملية مشابهة قد حدثت على المريخ والقمر وعلى العديد من أقمار الكواكب الأخرى وعلى الكواكب الصغرى لبلايين السنين. فمثل هذه الأجسام قادرة على تغيرات مذهلة في التوجه. وربما لا يمكن تقدير عواقب هذا الحدث بالنسبة إلى الحياة على الأرض، إلا أن بداية إدراكنا لهذه الإمكانية هي واحدة من أعظم الثورات الجديدة التي تجري في فهمنا لتاريخ الحياة.

ويعرف علماء الجيوفيزياء منذ أكثر من قرن أن الأقسام الصلبة لكوكب قد تتحرك بسرعة كبيرة نوعاً ما بالنسبة إلى محور الدوران. والمبدأ الأساسي هو أن الجسم الدائر يفضل الدوران حول ما يُسمى عزم العطالة القصوى. ومثال جيد على هذا هو لعبة الصحن الطائر Frisbee: فعندما يرمى بشكل صحيح يدور حول النقطة المركزية، ولما كان الجزء الأكبر من كتلة الصحن يقع على حافته، فإن ذلك يجعله يدور بصورة مستقرة. وإذا وضعت الآن كتلة صغيرة من الرصاص في مكان ما على القرص لكن ليس في مركزه، فسيتغير دوران الصحن الطائر في محاولة لإعادة توجيه نفسه ليأخذ وضع الكتلة الجديد هذا بعين الاعتبار، وسيحاول الصحن الطائر بحيث تكون الكتلة الثقيلة الجديدة أبعد ما يمكن عن محور الدوران، أي إنها تسعى إلى التموضُع على خط الاستواء. وبالمثل، على كوكب دوّار تجرّ قوى الجاذبية والطرد المركزي أي كتلة شاذة، ولكن على سطح كرة دوارة يحدث تغير أكثر انتظاماً بكثير، إذ سيتغير اتجاه محور محور الدوران بحيث إن الثقل الذي يتموضع، فرضاً، عند ثلثي المسافة بين خط الاستواء والقطب، يصبح الآن على خط الاستواء. فقد تغير محور الكرة الدوارة بسبب الكتلة الغريبة الجديدة التي أضيفت إلى سطحها.

ومن المعروف جيداً أن القمر والمريخ أعادا تنظيم أنفسهما بهذه الطريقة خلال تاريخهما الجيولوجي، فكلاهما أضيفت إلى سطحه كتل جديدة لم تكن أصلاً على خط الاستواء، لكنها صارت فيما بعد على خط الاستواء. وعلى سبيل المثال، منطقة هضبة ثورسيس Tharsis العملاقة (منطقة جيولوجية على سطح المريخ)

تتكون من كمية هائلة من حمم بركانية ثقيلة. وعلى مقاييس الزمن الجيولوجي كانت تماماً مثل الثقل الذي أضفناه إلى الصحن الطائر أو الكرة الدوارة، وقد أضيف بعد تشكل الكوكب. وهي في الواقع أضخم شذوذ الجاذبية الإيجابية في المجموعة الشمسية، ويتموضع بالضبط على خط الاستواء المريخي، وذلك في الوقت الراهن. وعلى القمر كشفت مسوح ما قبل أبولو تركزاً لكتل مرتبطة ببازلت بحار القمر، وهي على خط الاستواء أيضاً. فهذه العمليات سهلة الفهم إلى حد بعيد على القمر والمريخ لأن هذين الجرمين لا يوجد فيهما تكتونيات الصفائح. وتُسمى عملية إعادة المحاذاة هذه بانحراف القطب الحقيقي ***Tpw***. وقبل اكتشاف تكتونية الصفائح في 1966 كان يعتقد أن كل الدلائل على أن القطبين كانا في مواضع مختلفة في الفترات الجيولوجية الماضية كانت نتيجة الانحراف القطب الحقيقي ***Tpw***.

ويمكن أن يحدث التغيير السريع جيولوجياً للكتلة على كوكب بعدد من الطرق، بما في ذلك اصطدام كويكب أو مذنب كبير أو حتى لأسباب داخلية عند اندفاع الصهارة من أعماق الأرض إلى سطحها. وبالمثل، يمكن أن تحدث انزياحات كتل كبيرة عندما يظهر أو يختفي أحد أجزاء ملامح تكتونيات الصفائح التي تتكون من مراكز تمدُّد ومواقع اندساس Subduction sites (حيث تغوص صفيحة إلى الأسفل عائدة إلى أعماق الأرض). ويكفي أي من هذين الحدثين لإثارة الانحراف ***Tpw*** في ظروف كوكب الأرض، مادامت الكتل المشاركة مثبتة بقوة على السطح وليست مجرد طافية فوقه. وإذا اختفت؛ فستؤثر في توجه الكوكب. وقد تختفي مناطق الاندساس ومراكز التمدد حينما تصطدم قارة تخضع لانزياح قاري بقارة أخرى، إذ إن أي مركز تبعثر أو منطقة اندساس واقعة بعيداً عن شواطئ القارات المتلاقية تُدمَّر خلال الاصطدام، وفي هذه الحالة فقط تنجم إعادة التوجيه عن اختفاء كتلة سطحية وليس عن إضافة كتلة.

ولما كان من المستبعد أن تكون التغيرات البيولوجية الملاحظة المترافقة مع الانفجار الكامبري قد أجبرت القارات على التحرك، فالتفسير الأرجح هو أن ذلك التسارع المفاجئ في الحركة سَرَّع وتيرة التطور البيولوجي بطريقة ما. وقد اكتشفت آليات متعددة ربما تفسر بعض هذه المراقبات وتربط بينها. فأولاً، عندما تتموضع القارات في خطوط العرض العالية، فإنها تميل إلى تكوين مخازن كبيرة من الميثان المتجمد تُسمى المركبات القفصية، أو الكلاثرات Clathrates، أو هيدرات الغاز Gas hydrates في قاع البحار وفي التربة دائمة التجمد. ومع تحرك هذه المناطق نحو خط الاستواء، ستدفأ تدريجياً وقد تطلق

من حين إلى آخر نبضاتٍ من انبعاثات غازات الدفيئة إلى الغلاف الجوي؛ مما يؤدي إلى احترار البيئة بين حين وآخر. ويميل التطور وتنوُّع الأنواع بشكل خاص إلى التسارع في البيئات الأدفأ عبر آلية تسارع الاستقلاب Accelerated metabolism.

عندما طُرحت هذه الآلية أول مرة في الأدبيات العلمية، سمّيت «الصاعق الميثاني للانفجار الكامبري» Methane fuse for the Cambrian explosion وافترضت أن الدورات الحرارية للتنوع البيولوجي قد تكون من العوامل المسهمة في إطلاق تكاثر الأنواع. وقد تكون أيضاً سبباً محتملاً للتذبذب المجنون في نظائر الكربون. وتبين أيضاً أن التنوُّعات الأعلى جغرافياً موجودة بشكل طبيعي في منطقة خط الاستواء. وعندما بحث زميلنا من جامعة ييل روس ميتشل Ross Mitchell التحركات الجغرافية القديمة خلال حدث انحراف القطب الحقيقي هذا، لاحظ أن كل المجموعات الحيوانية المتطورة حديثاً، تقريباً، آنذاك نشأت على ما يبدو - على الحواف الأمامية للقارات، مع تحركها باتجاه منطقة خط الاستواء، ولم ينشأ إلا القليل منها عندما تحركت مناطق أخرى إلى خطوط العرض العالية. وتقدم هذه الزيادة في التنوُّع مع خط العرض تفسيراً بسيطاً بصورة مثيرة لزيادة التنوُّع، خاصة إذا كان هذا قد حدث عندما كانت الطبيعة تجرِّب مخططات الجسم عبر الجينات Hox. وهذا يعني أيضاً أن السجل الأحفوري لهذا الانفجار الكامبري قد يكون فيه بعض التحريفات، إذ من التأثيرات الجانبية للتقلقل القطبي الحقيقي حدوث امتدادات بحرية نسبية في المناطق المتجهة نحو خط الاستواء وانحسارات مستوى البحر في المناطق المبتعدة عنه. تُحفظ الرواسب أفضل خلال الامتدادات وتُزال خلال الانحسارات. ومن ثمَّ يظهر في السجل الصخري خلال أحداث انحراف القطب الحقيقي تحيزٌ نحو حفظ الصخور التي تسجل زيادة التنوُّع.

والاستعانة بانحراف القطب الحقيقي في تفسير أحداث تاريخ الحياة هي بالتأكيد ميدان بحثي جديد لم يسمع به في القرن العشرين. ومثلما تستخدم هذه الآلية هنا كفرضية جديدة للانفجار الكامبري، يمكن استخدام الانحراف **Tpw** في محاولة تفسير آليات القتل في الانقراضات الجماعية التي أنهت واحدا منها في العصر الكامبري والانفجار الكامبري، وقضى على كل تلك العجائب الغريبة تقريباً التي وصفها ستيفن غولد وسايمون كونواي موريس العائدة لطَفَل بيرغس. وأطلق على هذا الانقراض الجماعي المصطلح غير الملائم **SPICE**.

نهاية الكامبري - حدث SPICE وأول انقراض جماعي في عصر البشائر

أي قصة تروي تاريخ الانفجار الكامبري يطغى عليها مدى قوة وأهمية تطور مخططات أجسام الحيوانات والتغير الجذري في الكائنات الحية العالمية، من حيوانات طافية غير متحركة وحيوانات بسيطة أكبر حجماً في أواخر العالم ما قبل الكامبري إلى التنوّع الوافر من حمولة السفينة من الحيوانات الذي ملأ محيطات العالم في نهاية الكامبري. ولكن، لماذا حدثت «نهاية الكامبري» أساساً؟ إنه موضوعٌ انقلبت فيه المفاهيم التي طالما حظيت بقبول واسع.

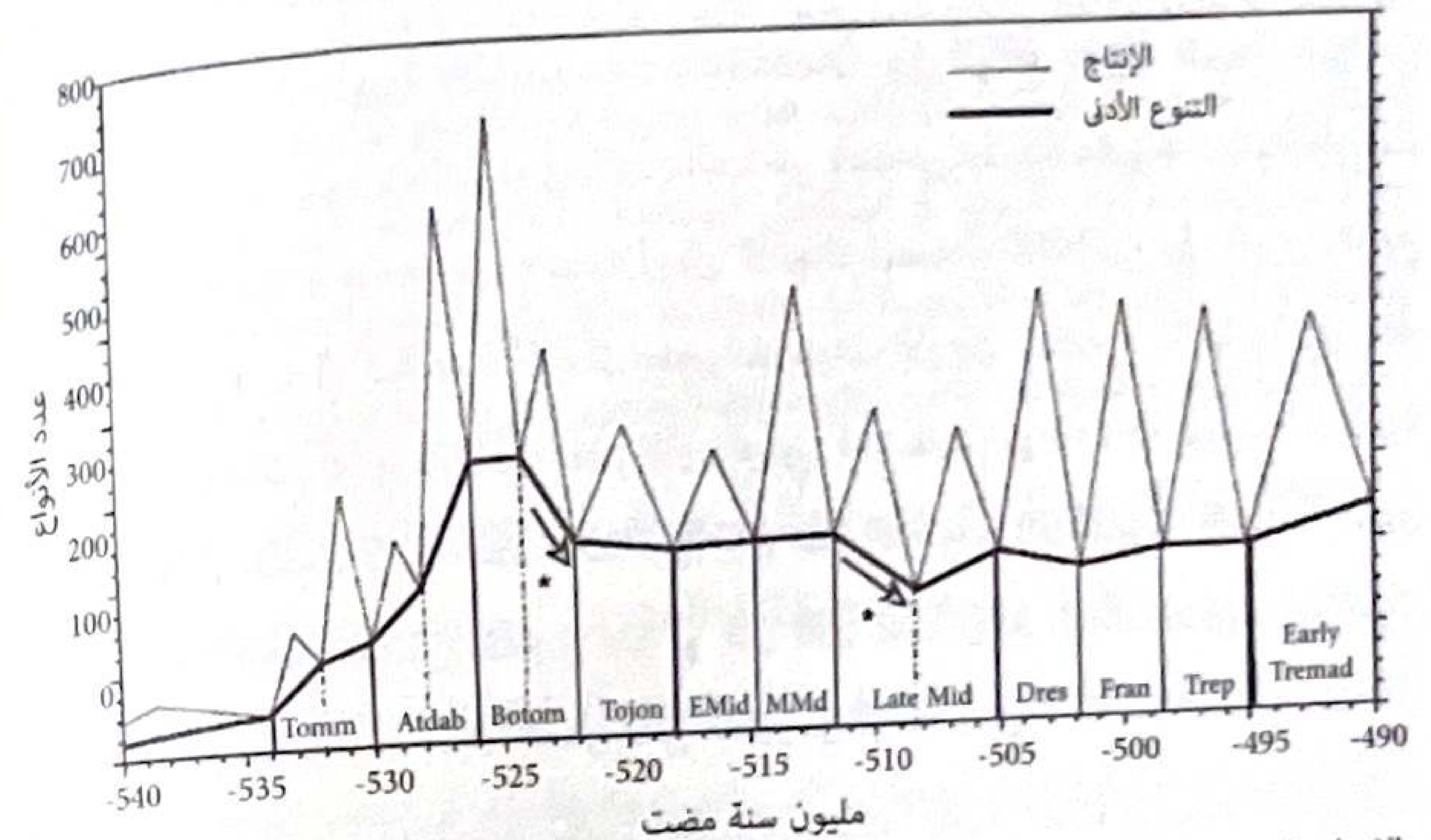
وتفاوتت الانقراضات الجماعية -أي تلك الفترات قصيرة المدى من وفيات عالية بين الأفراد والأنواع على حدٍ سواء- في شدتها. وبينما تدرج أعظمها ضمن فئة «الخمسة الكبرى» من الانقراضات الجماعية، عندما انقرض خمسون في المئة من الأنواع على الأقل، فقد وقعت أحداث انقراض عديدة أخرى إن لم تكن بتلك الكارثية (إلا إذا كنت أحد ضحاياها طبعاً)، وواحد من أشهر هذه الانقراضات وقع في نهاية العصر الكامبري.

وكان الانقراض الجماعي في الكامبري المتأخر في الواقع ثلاثة أو أربعة أحداث انقراض أصغر منفصلة، طالت بشكل أساسي التريلوبيت وغيره من اللافقاريات البحرية، ولاسيما عضديات الأرجل Brachiopods. وكان من المسلم به منذ فترة طويلة أنها نجمت عن الزيادات في كتل المياه الدافئة منخفضة الأكسجين المؤثرة في المجتمعات البحرية. وانقرضت تماما واحدة من أبكر التريلوبيت ظهوراً: الأولينيليدات Olenellids. وفي الواقع تغيرت طبيعة حيوانات التريلوبيت كلياً: فتريلوبيت الكامبري كان يتألف من فصوص عديدة وعيونه بدائية وليست له تكيفات دفاعية واضحة على جسمه (مثل الأشواك المضادة للافتراس) ولم يكن يستطيع الالتفاف على نفسه في كرة محكمة مثل بعض مفصليات الأرجل المعاصرة كالحشرة المدرعة. أما بعد الانقراضات، أي في بدايات العصر الأوردفيشي، فقد غيرت موجات التريلوبيت المتطورة حديثاً مخطط جسمها كلياً: خفّضت معظمها الآن عدد الفصوص (فالفصوص العديدة أسهل اختراقاً خلال هجوم الكائن المفترس مما لو كان أقل عدداً وأكثر ثخناً) وصارت لها عيون أفضل ودروع دفاعية، ولا سيما القدرة على التكوّر في كرات شبيهة بكرات الحشرة المدرعة.

الدفء والأكسجين المنخفض وتغير الحيوانات، هكذا كانت النظرة إلى هذه الانقراضات الكامبرية المتأخرة. وبعد ذلك حصلنا على سلسلة جديدة بالكامل من البيانات تشير إلى العكس تماماً: دليل على ماء بارد وليس أدفأ ودليل على كميات عظيمة من المادة العضوية في المحيطات، وهذه العملية من شأنها أن ترفع تراكيز الأكسجين بصورة حادة. وتدعى هذه

التغيرات الآن الحدث **SPICE** (اختصاراً للعبارة Steptoean Positive Carbon Isotope **Excursion**، أي الانحراف الإيجابي الستيبتوني لنظائر الكربون). ولكن هناك تناقضاً كبيراً مع هذه الموجودات الجديدة. فقد اكتشفت أولاً في السجل الصخري ليس فقط بسبب الانقراض المفاجئ للأنواع، لكن أيضاً كاضطراب كبير في سجل نظائر الكربون، ومن ثمّ دورة المغذيات الكربونية. ويوجد دليل جيد جداً على أن نسبة كبيرة من التريلوبيت نفقت في تعاقب انقراضات قصيرة الأمد قرب نهاية العصر الكامبري.

ومن النواحي الأكثر إثارة للاهتمام للحدث **SPICE** هو أنه - بخلاف معظم الانقراضات الكبرى الأخرى - ربما ترافق ليس بنقص الأكسجين بل بارتفاع قصير الأمد في تراكيزه. ومن المشوق أن نطرح فرضيةً مفادها أن انفجاراً بركانياً معروفاً في ذلك الوقت ربما سبب واحداً من التحركات القارية السريعة قصيرة الأمد المذكورة سابقا، أي حدث انحراف القطب الحقيقي. وفي هذه الحالة انتقلت مساحات أوسع من اليابسة إلى المناطق المدارية لبضعة ملايين سنة، مع زيادة دفن الكربون وارتفاع أكسجين الغلاف الجوي إلى مستويات غير مسبوقة حينها. وشيء من هذا القبيل ربما مَهّد الطريق للتشعب العظيم للحياة بعد للانفجار الكامبري. فهناك شكل من النظم الإيكولوجية يحتاج إلى كمية كبيرة من الأكسجين، وقد ظهرت الشعاب المرجانية سريعاً بعد الحدث **SPICE**، مبتدئة العصر الجيولوجي التالي: الأوردفيشي.



الإنتاج البيولوجي والتنوع الجيني خلال الانفجار الكامبري. وامتدادات فترة الانفجار الكامبري الكلاسيكي: المراحل التوموتية Tommotian والاتدابانية Atdabanian والبوتومية Botomian في الجرف السيبيري. ويبين مقدار الإنتاج عدد الاجناس التي إما نشأت أو اختفت خلال مرحلة خاصة.

(Bambach *et al.*, «Origination, Extinction, and Mass Depletions of Marine Diversity», Paleobiology 30 (2004):52242)

9

تشعّب الحيوانات الأوردفيشي الديفوني: ما بين 500–360 مليون سنة مضت

دُعيت الشعاب المرجانية الحديثة بـ"الغابات المطيرة للمحيطات"؛ لأنها تتشاطر مع الغابات المطيرة صفةَ التنوع العالي في الأنواع ووفرتها في مساحات صغيرة، وذاك هو الانطباع الأول المشترك الغالب - أيْ يوجد كثير من الحياة، لكن عند هذا الحد تنتهي المقارنات إلى حد كبير. ففي الغابة المطيرة، أو أي غابة، معظم الحياة التي يمكن العثور عليها هي حياة نباتية. ومن جهة أخرى، تتألف الشعاب تقريباً من الحيوانات حصرياً، وفي الواقع، توجد في أي شعاب أعدادٌ كبيرةٌ من أشكال ورقية شجيرية الشكل شبيهة بالنباتات. ومع ذلك، فكلها تقريباً قد تُشكَّل من الحيوانات، من المرجان الطري إلى الإسفنج إلى الحيوانات البرايوزوا الشبيهة بالدانتيلا. ويمكن للمرء أن يجادل في أن الأخضر الحشيشي لنباتات البناء الضوئي التي تغطي مساحات واسعة من قارات كوكبنا هو الدليل الأكثر وضوحاً، إذا شوهد من الفضاء، على أنّ كوكبنا هو عالم من الحياة. ويوجد نوع مختلف كلياً من الإشارات البيولوجية التي يمكن رؤيتها من الفضاء - هذا النوع موجود في البحار. إنه ظهور الشعاب المرجانية البحرية المدارية التي يمثلها الحيد المرجاني العظيم Great Barrier Reef أفضل تمثيل، ويمتد مسافة تفوق ألف ميل من خط الشاطئ الأسترالي الشرقي. ومع ذلك، توجد شعاب عديدة أكثر من الحيد المرجاني العظيم، ورائعة مثله. فالبحار الاستوائية مليئة بالعديد من الجزر المرجانية والأطر المرجانية والبحيرات الشاسعة من الأخضر الفاتح التي تحتويها هذه البُنَى البيولوجية. وهذه النظم الشعابية هي أقسام من نوع قديم جداً من النظم الإيكولوجية، النوع الذي يسبق نشوء الغابات، وحتى الحياة الحيوانية الأرضية من أي نوع. وهي تبقى واحداً من أكثر النظم الإيكولوجية تنوعاً، وهي جوهرياً كائنات حية فائقة تعيش لفترة طويلة وتنبثق مجدداً بعد كل انقراض جماعي وفناء كوكبي خلال الزمن الممتد من 540 مليون سنة الماضية.

العلامة الفارقة لبيئة الشعاب المرجانية هي غزارة الحركة في كل مكان تقريباً، من رفرفة الأسماك وحركة أسرابها إلى الحركة الموجية التي لا تتوقف في الحيد، إلى التمايل

والتثني للمرجان الطري، نابضاً ومتموجاً في حركة المياه النشيطة التي تميز بيئة الحيد وكل حيد مرجاني هو موطن للأسماك – العديد من الأسماك، من عدة قياسات وأشكال وهيئات. فبعضها يسير في أسراب، وبعضها ينسل انسلالاً، وبعضها يسبح منفرداً باعتزال وبعضها – أسماك القرش المنتشرة في كل مكان – يتنقل ببساطة في دوريات. وليست فقط أفراد الفقاريات من هذه المجتمعات المتنوعة هي التي تبدو في حركة مستمرة، فالفحص القريب يُظهر أن تنوُّعاً مذهلاً من اللافقاريات يبدو أيضاً في حركة ثابتة – حتى ولو كانت عادة أبطأ من الأسماك. ويرقص روبيان الحيد الأصغر من مرجان إلى مرجان، في حين يمكن أن ترى سرطانات البحر الكبيرة والصغيرة في بحثها المستمر عن الطعام، وحتى الحلزونات الأبطأ تتجول تبعاً لخطة ما تعرفها هي فقط، وبطنيات الأرجل التي يمكن العثور عليها في أي حيد متنوعةٌ كذلك: هناك أنواع كبيرة من آكلات اللحوم، مثل التريتونات Tritons الجميلة، فضلاً عن أصداف القواقع Conch shells الكبيرة المشابهة لها، لكنها عاشبة. وتحت الأنقاض المرجانية، على الأقل خلال النهار، تجمعات غزيرة من أنواع قواقع الكاوري Cowries الجميلة تحتشد أو تتغذى ببطء بقطع صغيرة من الطحالب، في حين تتحرك الأصداف المخروطية الشرسة بينها باحثة عن الفريسة الطبيعية لمعظم أفراد نوعها – وهي الديدان الصغيرة. إلاّ أنّ بعض الأنواع، مثل المخاريط النسيجية Textile cones، هي آكلة للسمك وتستخدم أسناناً معدلة جدا، تأخذ شكل الحربة، ومغمورة بالسم لتطعن السمك ثم تلتهمه كلياً. ويتحرك خيار البحر Sea Cucumbers على الرواسب القاعية، أو تحت سطحه فقط، ليتناول باستمرار كميات كبيرة من الرمل من إحدى نهايتيه ويقذف باستمرار كرياتٍ رمليةً كبيرة من النهاية الأخرى. وهناك تتشارك الجزء العلوي من رمل الحيد الأبيض مع قنافذ البحر القلبية Hear Urchins، وتكون باقي شوكيات الجلد هناك أيضاً، من مجموعة متنوعة من نجمة البحر المفترسة إلى زنبقيات البحر الكوماتوليدية Comatulid crinoids الطافية بهدوء – والسابحة أيضاً. إنه اللون والحركة الظاهرة لتجمُّع كبير ومتنوع من الأنواع. والأنظمة الإيكولوجية للحيد المرجاني لهذه الأيام مملوءة بالحركة واللون، وهناك العديد من الأسباب التي تدعو إلى الاعتقاد أن كانت دائماً كذلك.

والشعاب المرجانية في الواقع هي ابتكارات تطورية قديمة جداً،[1] وبروزها إلى الصدارة يعكس بزوغ التنوُّع الكبير الذي جاء بعد الانفجار الكامبري، فيما يشبه بطريقة ما القنبلة الهيدروجينية. إنه الاندماج النووي الحراري والانفجار الهائل الذي يحدث

فقط نتيجة للحرارة الهائلة لانفجار نووي، أيْ كيفية عمل القنبلة الهيدروجينية: إشعال قنبلة نووية (انشطارية) من البلوتونيوم والتي بدورها تخلق حرارة وضغطاً كافيين لبدء التفاعل الاندماجي – والانفجار الاندماجي. وبطريقة مماثلة، كان الانفجار الكامبري للتنوع الحرارةَ والوقودَ اللذين قادا إلى التنوع الأوردفيشي الأكبر بكثير، وابتكار الحيد المرجاني كان أحد المنتجات الأكثر أهمية لهذه الارتفاع الهائل في عدد الأنواع.

ويعود تاريخ الحيود الأولى – ونحن نقصد بالحيد تلك البنية ثلاثية الأبعاد المقاومة للأمواج والمبنية من الكائنات الحية – بكل الطرق إلى أوائل العصر الكامبري. وهي لم تكن حيوداً مرجانية بل كانت مكونة من إسفنجيات عتيقة تدعى الكاسيات العتيقة Archeocyathids المنقرضة من زمن طويل.[2] والحيود المرجانية أحدث قليلاً؛ فقد عُثر على أولها في العصر الأوردفيشي، وقد ازدادت فعلياً بالتوزع والحجم والتنوع في العصر الديفوني Devonian period. وبقيت نظاماً إيكولوجيا قابلاً للتمييز الإيكولوجي وثابتةً نوعاً ما حتى نهاية البرمي – عندما دمّرها، وكثيراً غيرها، الانقراضُ البرمي الجماعي.

دعونا نتخيل أننا كنا قادرين على العودة في الزمن والغطس في حيد من الحقبة الأولية، حيد بعمر 400 مليون سنة. وعند النظرة الأولى هناك تشابه مبهر مع حيود اليوم. فالمرجان يهيمن على الحيود؛ فهي لبنات لبنية ثلاثية الأبعاد للحيود، وكما في منزل مبني بالطوب، تتماسك هذه الأحجار فيما بينها بأنواع مختلفة من ملاط بيولوجي يتكون معظمها من أنواع مغلّفة بقشرة تعمل على ربط الرؤوس العديدة والسعفات المرجانية لتشكل أسواراً هائلة ومعقدة وقواعد من الحجر الجيري. ولكنْ، عند النظر عن قرب، يمكن رؤية الاختلاف الكلي للمرجان الذي عمره 400 مليون سنة من حيث المظهر الأساسي، وبالتأكيد من حيث التصنيف التكويني. فالرؤوس المرجانية الضخمة تتألف من فصيلة تبني أشكالاً عامة مشابهة لمرجان اليوم لكنها بالتأكيد مختلفة جداً من الناحية الشكلية الأدق: إنها الشعاب المرجانية القُرصِية Tabulate corals التي ملأت الفجوات الإيكولوجية ذاتها Niches كما هي الحال اليوم مع مرجان السكليراكتينيا Scleractinian corals، المرجان الشائع في حيود عصرنا الحديث. وبين شديدة التفرع تلك ومستعمرات المرجان المسطحة نصف الكروية، يوجد «بناة هيكل» آخرون، لبنات أخرى في الجدار. فالعديد من هذه اللبنات هي من الستروماتوبورويد Stromatoporoids، ذاك الإسفنج الغريب المنتج للكربونات الذي مازال يعيش اليوم،

ولكن ليس أبداً بمثل الحجم والتنوع الذي كان فيه في دهر الحقبة الأولية. ويتبعثر بين هذين القاطنين الكبيرين نوع ثانٍ من المرجان المنعزل بطبيعته، ويدعى المرجان المغضّن Rugose corals، وهو من الأنواع الفردية Solitary التي تبدو مثل قرون الثور، لكنها في هذه الحالة تكون النهاية المدببة للقرن -هيكل كربونات الكالسيوم لهذا المرجان المغضن- مُثبّتة في الركيزة، والنهاية الأعرض، المواجهة، هي مركز لحيوان وحيد عريض يشبه شقائق النعمان البحرية.

ومثل مرجان السكليراكتينيا الحديث، ومهما كان كِبَر حجمها وعدد الأجسام الصغيرة ذات المجسات التي هي هيكل الجسم الأساسي للمرجان، فالشعاب القرصية كانت "فرداً" واحداً - على الأقل جينياً. وكل المرجان في الواقع، وبالتأكيد حينها والآن، هو مستعمرات واسعة من بوليبات (سليلات) Polyp دقيقة شبيهة بشقائق النعمان البحرية، ويتألف كل منها من حلقة من مجسات مسمومة الرأس تحيط بفم مركزي صغير. ولكن، بخلاف صخور شاطئ البحر المغطاة بالقليل من شقائق النعمان البحرية الشائعة الصغيرة، وهي بوليبات مفردة، والموجودة في جميع أنحاء العالم، فكل من هذه البوليبات الدقيقة مرتبط بالبوليبات الأخرى حوله بغلالة رقيقة من نسيج. وكل جزء من هذه المستعمرات، التي تكون في بعض الأحيان واسعة، يكون متطابقاً وراثياً. إنها ليست مجرد حيوان واحد فقط، ففي الواقع يقوم أي مرجان بدعم توليفة واسعة ومتنوعة من النباتات ضمن أنسجته. وعبر النسيج الرابط بين بوليب وآخر، وكذلك ضمن البوليب بحد ذاته، توجد أعداد لا تُحصى من نباتات دقيقة - دواميات السياط وحيدة الخلية Dinoflagellates التي تحيا في نعيم التعايش مع المرجان. إنها صفقة كبيرة لكليهما، فالنباتات الدقيقة تحصل على أربع أشياء هي أعظم ما تريده: الضوء وثاني أكسيد الكربون، والمغذيات (النترات والفوسفات)، والحماية ضمن الشِعب المرجاني، الحماية من الكائنات الحية العديدة التي سترغب بتناول عشاء من نبات لذيذ حتى ولو كان صغيراً.

التنوُّع الأوردفيشي: البناء على الانفجار الكامبري

وصل العصر الكامبري إلى نهايته بسبب الانقراض الجماعي، الانقراض الذي أثر في العديد من الكائنات الأكثر نجاحاً لما صار معروفاً بحيوانات الكامبري - الحياة البحرية المؤلفة من وافدين من الحيوانات الأبكر في تاريخ الحياة الحيوانية كلها مثل ثلاثيات الفصوص وعضديات الأرجل والعديد من مفصليات أرجل غريبة جداً في طَفل بيرغِس

مثل الأنومالوكاريس *Anomalocaris* (على الرغم من أنه في عام 2010 اكتشفت رواسب أحفورية جديدة تعود إلى العصر الأوردفيشي، تحتوي على أصغر أنومالوكاريس على الإطلاق، ومن ثمّ فربما كان الانقراض الجماعي في الكامبري المتأخر أكثر لطفاً مع بعض حيوانات طَفل بيرغِس الغريبة مما كان يعتقد سابقاً). فقد كان معروفاً لفترة طويلة عن هذا الانقراض الخاص (الذي لم يوصف بأنه كبير) بأنه أفنى أقل من خمسين في المئة من الأشكال البحرية. وقد مارس دوراً يشبه عمل الغازولين على نار التنوّع المفتوحة، فربما ماتت فقط النماذج التي كانت أقل تكيفاً؛ مما فتح الطريق لابتكار جديد وأنواع جديدة بالطريقة نفسها التي تحدث عند تخليص حديقة من الأعشاب الضارة، والذي يقود إلى تكاثر سريع لنمو جديد من النباتات غير الضارة.

كان الوضع أيضاً كما لو أنّ العالَم البيولوجي قد اكتشف طرقاً جديدة كلياً لعيش الحيوانات والنباتات، ولإيجاد أماكن جديدة كلياً للحياة أيضاً: أماكن كان استيطانها بالسكان قليلاً في الكامبري، مثل المياه قليلة الملوحة Brackish والمياه العذبة، وكذلك المناطق الأعمق والأضحل من البحر، وصولا إلى نطاقات السطح نفسه، التي صارت ملائمة لاستيطانها من قبل الحيوانات. والعديد من هذه الحيوانات كان مازال خاملاً، أفنى حياته كلها جالساً في مكان واحد، مصفّياً البلانكتون البحري الأغنى والأكثر احتواء على المغذيات على الإطلاق. ولكن أعداد الأنواع وأرقام الكتل الحيوية قفزت على حدّ سواء.[3]

وُجدت أنواع عديدة من الحيوانات في الأوردفيشي لم تكن قد تطورت في الكامبري بعد، والعديد منها ظهر مباشرة بعد نهاية الانقراض الكامبري الجماعي. والنتيجة كانت هي توليفة من الحيوانات التي اختلفت بشكل ملحوظ عن معظم حيوانات الكامبري. وما زالت ثلاثيات الفصوص هناك، مقارنة بمحيطات الكامبري، حيث ربما كانت الحيوانات المصادفة الأكثر شيوعاً في معظم الأعماق، وكانت مهيمنة عددياً وكذلك في عدد أنواع الحيوانات ذات الصدف - عضديات الأرجل وأكثر من بضع رخويات كذلك. وأكثر الرابحين هم الحيوانات التي طورت طريقة جديدة كلياً للعيش - الحيوانات التي كانت تعيش في مستعمرات. وفي حين كان تشكيل المستعمرة شيئاً مستخدما من قبل بيولوجيا أخرى أبسط بكثير في هيكل الجسم، بما في ذلك أنواع عديدة من النباتات والميكروبات والطلائعيات، فقد سيطرت في الأوردفيشي النزعة للحياة في مستعمرات وقادت التنوُّع الذي لا هوادة فيه والذي هو السمة المميزة للأوردوفيكي: مرجان وبيروزوا وأنواع جديدة من الإسفنجيات بين أنواع أخرى عديدة.

تعود أسباب هذا التنوّع الكبير إلى الأكسجين.[4] ورأينا هو: أن التأثيرات الحقيقية للأكسجة في البحر قد تفهم من هذه النقطة. ومن ثمّ سنضع هنا تفسيراً وضعه المؤرخون، تفسيراً ما زال حتى الآن جديداً بما يكفي لكي لا يعتبره العلم حقيقة قوية، لكنه يمتلك قوة تفسير هائلة. وهو يسمح لنا أيضاً ببحث مناسب جداً في هذه النقطة من الكتاب حول النظرة العامة للتنوّع الحيواني. وسنجادل في أن مستويات الأكسجين العامل الأكثر أهمية من أي عامل آخر في تأثيره على منحنى تنوع الحيوانات عبر الزمن والنتائج علمية بحق ومقبولة.

ويمكن اعتبار العصر الأوردفيشي القسم الثاني من قسمين اثنين لابتداء التنوّع الحيواني على الأرض، أما القسم الأول فكان الانفجار الكامبري.[5] وفي كلتا الحالتين كان ارتفاع تركيز الأكسجين هو المُوجِّه. وكما هي الحال مع الكامبري، كان وقتاً لظهور أنواع جديدة فضلاً عن أنماط جديدة من مخططات الأجسام ظهرت بمعدل أسرع مما كان مميزاً للأزمنة الأكثر حداثة. وكان هذا المعدل المرتفع للتطور والابتكار جزئياً استجابة لامتلاء العالم بالحيوانات للمرة الأولى. وقد كان تاريخ الحياة في الكامبري ممثلاً بامتلاء البحار بالعديد من التجارب، ويتمثّل تاريخ ما بعد الكامبري بالاستعاضة عن العديد من هذه التصاميم التطورية الباكرة والبدائية حكماً وغير الكُفُؤة بما صار زيادة صاروخية في التنوّع الحيوي كمنافسة قتلت بلا رحمة الكائناتِ الأقل لياقة. فقد صار التطور وسائل لاستكشاف التفوق الهندسي لمخططات الأجسام.

تأريخ تاريخ التنوع الحيوي

أول من عرض تاريخ التنوّع الحيوي، الذي يمكن اعتباره كتجميع وأعداد من فئات مختلفة من الكائنات الحية (الحيوانات خصوصاً، لأنها تركت الأحافير الأكثر وفرة وقابلية للتعرف عليها)، كان الجيولوجي الإنجليزي جون فيليبس John Phillips، الذي يرجع إليه الفضل أيضاً في تقسيم مقياس الزمن الجيولوجي من خلال إدخال مفاهيم الحقب القديمة الأولية Paleozoic والوسطى Mesozoic والحديثة Cenozoic. وفي عام 1860 نشر فيليبس عمله الضخم الذي عرّف هذه الحقب الجديدة وميز نمطاً أوسع نطاقاً من التغيير التطوري الذي قد يُعثر عليه في السجل الأحفوري، وأدرك هذا العالم أنه يمكن استخدام الانقراضات الجماعية الكبيرة في الماضي لتقسيم الزمن الجيولوجي، لأن أعقاب كل حدث مماثل أفضت

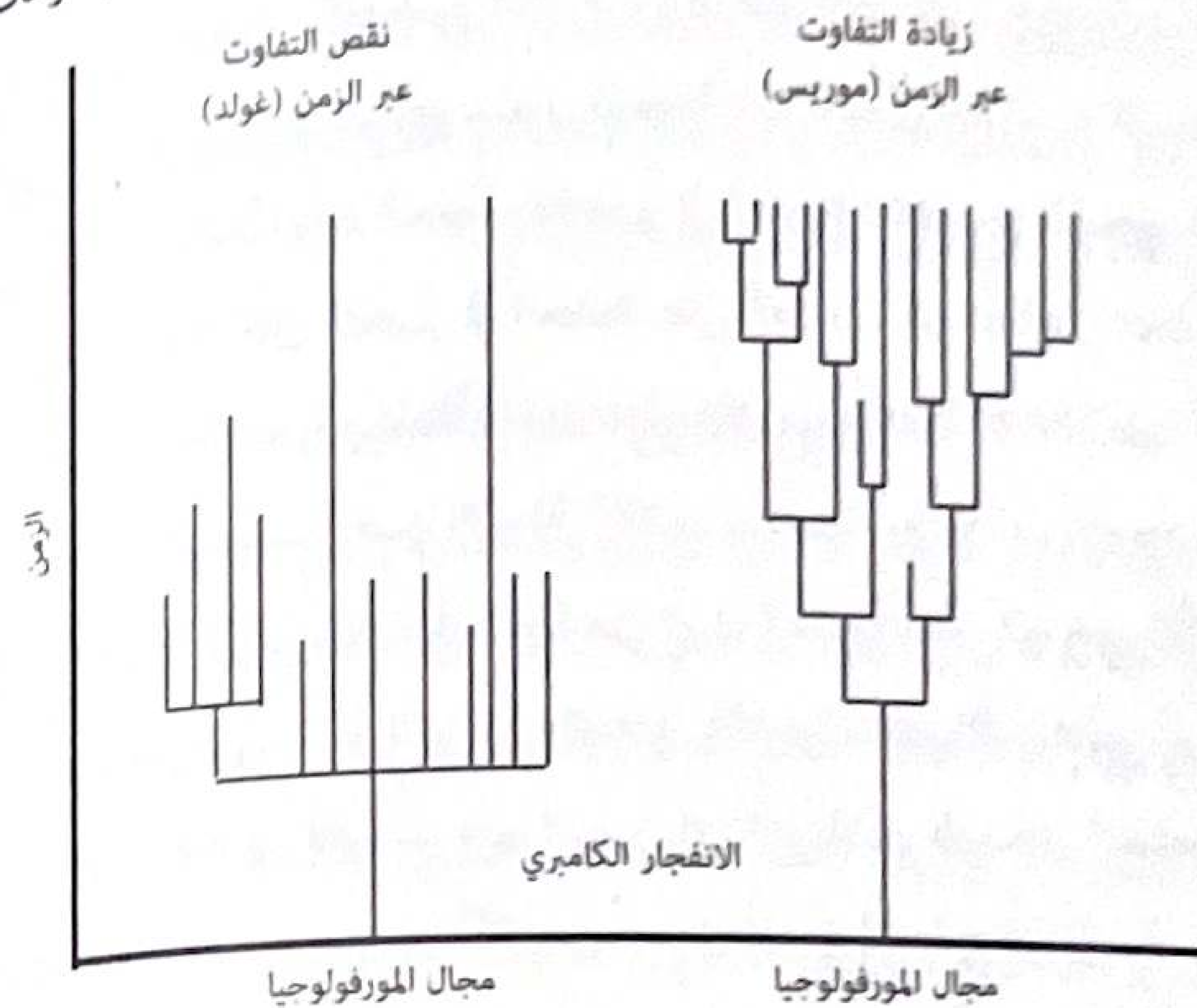
إلى ظهور حيوانات جديد كما تعرّف عليه في السجل الأحفوري. غير أن فيليبس قام بأكثر من مجرد إدراك أهمية الانقراضات الجماعية الماضية وتعريف مصطلحات جيولوجي جديدة، فهو افترض أنّ التنوُّع في الماضي كان أقل بكثير منه في زمن الحديث، وأنّ الارتفاع في التنوُّع الحيوي كان إحدى الزيادات الإجمالية في عدد الأنواع، باستثناء الفترة الواقعة الانقراضات الجماعية ومباشرة بعدها. وأدركت صيغته أنّ الانقراضات الجماعية أبطأت التنوُّع، لكن بشكل مؤقت فقط. كانت وجهة نظر فيليبس في تاريخ التنوُّع جديدةً تماماً، ومضى قرن بعدها قبل أن يعود الاهتمام العلمي بهذا الموضوع.

وفي أواخر ستينات القرن العشرين، نظر عالما الأحافير نورمان نيويل Norman Newell وجيمس فالنتاين James Valentine مجدداً إلى مشكلة الزمن الذي صار العالم فيه مسكوناً بالأنواع الحيوانية والنباتية وبأي معدل.[6] وتساءل كلاهما عما إذا كان النمط الحقيقي للتنوُّع زيادةً سريعةً في الأنواع تلت ما يدعى الانفجار الكامبري من نحو 520 إلى 530 مليون سنة (باستخدام تواريخ منقحة، وليست تلك المفضلة في ستينات القرن العشرين) وأعقبتها حالة مستقرة تقريباً. وتستند حجتهما إلى أهمية التحيز في الحفظ بالصخور الأقدم. وربما كان نمط التنوُّع المتزايد الملاحظ عبر الزمن من قبل فيليبس في الواقع سجلّ الحفظ عبر الزمن أكثر منه النمط التطوري الحقيقي للتنوُّع. وتبعاً لهذه الحجة، فالتغير في الأنواع تناقَص في الصخور الأقدم على الإطلاق، ووفق رأيه، كان التحيز في الحفظ على العينات هو العامل الحقيقي المنتج لما يدعى التنوُّع. وتلقف عالم الأحافير ديفيد روب David Raup هذا الرأي حالاً وكرره بعد ذلك في سلسلة من الأوراق[7] التي دافعت بقوة عن وجود تحيز كبير ضد الأنواع الأقدم المُكتشفة والمُسماة من قبل العلماء؛ لأن الصخور الأقدم تشهد تبدلاً أكثر عن طريق إعادة التبلور والدفن والتحول، فهناك مناطق أو مقاطعات جغرافية حيوية بكاملها فُقدت عبر الزمن (وذلك أنقص السجل الخاص بالصخور الأقدم)، وتوجد ببساطة صخور أكثر من أعمار أصغر لتخضع للدراسة.

لقد هيمن الجدل -حول ما إذا كان التنوُّع قد أظهر زيادة سريعة عبر الزمن، أو حقق مستوى عاليا باكراً فيه وبقي تقريباً مستقراً منذ ذلك الوقت- على أبحاث علم الأحافير لمعظم القسم الأخير من القرن العشرين. ففي سبعينات ذاك القرن بدأت عملية بناء قواعد بيانات ضخمة مشتقة من سجلات مكتبية شرع فيها روب

ثم تبعه جاك سيبكوسكي Jack Sepkoski [8] من جامعة شيكاغو جنباً إلى جنب مع زملائه وطلابه. وهذه البيانات، التي تجمع سجل اللافقاريات البحرية في البحر، ومعها قواعد بيانات أخرى للنباتات الأرضية والحيوانات الفقارية، أظهرت تبريراً لرأي فيليبس الباكر، وخصوصاً تلك المنحنيات المكتشفة من قبل سيبكوسكي التي أظهرت سجلاً صارخاً مع ثلاث نبضات أساسية من التنوُّع اضطلعت بها تجمعات مختلفة من الأحياء.

وشُوهدت النبضة الأولى في الكامبري (ما يسمى حيوانات الكامبري، تكونت من ثلاثيات الفصوص وعضديات الأرجل ولا فقارات عتيقة أخرى). وتبعتها الثانية في الأوردفيشي الذي أدى تقريباً إلى حالة مستقرة خلال بقية الحقبة القديمة (حيوانات الحقبة القديمة، تكونت من مرجان بانٍ للحيود وعضديات أرجل ذات مفاصل وراسيات أرجل وشوكيات جلد عتيقة)، ثم جاءت الذروة عبر الزيادة السريعة البادية في الحقبة الوسطى والمتسارعة في الحقبة الحديثة لتنتج المستويات العالية من التنوُّع الذي يشاهد في عالم اليوم، عبر تطور الحيوانات الحديثة التي تكونت من بطنيات الأرجل والرخويات ثنائية الصمام ومعظم الفقاريات والشائكيات ومجموعات أخرى.



الفرضيات المتنافسة حول التفاوت والانفجار الكامبري. ويشير التنوع إلى عدد الأنواع، في حين يشير التفاوت إلى عدد الأنماط المختلفة للتشاريح، أو مخططات الأجسام. ويعتقد ستيفن جاي غولد أنه كانت توجد مخططات أجسام أكثر بكثير (تفاوت عالٍ) خلال الانفجار الكامبري منه الآن، وقد أشار إلى العديد من الأحافير الغريبة من طفَل بيرغِس على أنها "عجائب غريبة" واعتقد أنها كانت شُعباً انقرضت الآن تماماً. أما الرأي المعاكس؛ فتمسك به سايمون كونواي موريس الذي أيّد أن التفاوت تزايد ببطء عبر الزمن.

وهكذا، فخلاصة الرأي حول التنوُّع خلال 500 مليون السنة الأخيرة كانت تقريباً مشابهةً لما قدمه جون فيليبس في عام 1980: توجد الآن أنواع على الكوكب أكثر مما كان في أي وقت مضى. وما يشجّع أكثر هو ما بدا أنّ مسار التنوُّع البيولوجي يظهره، وهو أنّ محرك التنوُّع - العمليات المنتجة لأنواع جديدة -كان في حالة تأهب قصوى؛ مما يوحي أن الكوكب سيستمر في المستقبل بالحصول على أنواع أكثر من أي وقت مضى. وبينما لم تُعرض في أي سياق بيولوجي فلكي، فهذه النتائج لا توحي بالتأكيد أن كوكب الأرض دخل بأي شكل في شيخوخة كوكبية. وبشكل عام، فالاعتقاد الذي دام 130 سنة، من وقت عمل جون فيليبس إلى ذاك الذي قدمه جاك سيبكوسكي، ومضمونه أنه توجد الآن أنواع أكثر مما كان في أي وقت مضى، بقيت وجهة نظر مطمئنة. وهذا الاعتقاد العلمي الذي تمّ التمسك به لفترة طويلة أوحى لكثيرين أننا في أفضل الأوقات البيولوجية (على الأقل فيما يخص التنوُّع البيولوجي العالمي)، وأنه توجد المبررات جميعها للإيمان بأنّ أوقاتاً أفضل، وعالماً أكثر تنوُّعاً وإبداعاً أيضاً، لا تزال أمامنا، حتى دون مساهمات غريبة من التقانات الحيوية.

وبينما بدا عمل سيبكوسكي أنه يظهر عالماً كان فيه التنوُّع الجامح علامةً فارقةً في أواخر الحقبة الوسطى حتى الأيام الحالية، ظلت المخاوف قائمةً حول بقاء التحيز شديد الواقعية في جمع العينات والموصوف من قبل عاملين أوائل في المجال، وقد أُجريت سلسلة من الاختبارات المستقلة حول التنوُّع. والأكثر إثارة للقلق كانت ظاهرة يُطلق عليها اسم «تأثير الحديث» Pull of the recent - وهي أن المنهجية المستخدمة من قبل سيبكوسكي ستقلّل من مقدار التنوُّع في الماضي السحيق، فيبدو كما لو أن هناك أنواعا أكثر في الأوقات الأكثر حداثة. وبسبب هذا القلق شديد الواقعية، صُمِّمت اختبارات جديدة لفحص التنوُّع البيولوجي عبر الزمن. وفي القسم الباكر من الألفية الجديدة أعاد فريق كبير دراسة القضية[9] بقيادة تشارلز مارشال Charles Marshall من هارفارد (الآن في باركلي) وجون ألروي John Alroy، كان وقتها في جامعة كاليفورنيا بسانتا باربارا. وقد جمّع هذا الفريق قاعدة بيانات أكثر شمولاً استناداً إلى مجموعات متاحف فعلية بدلاً من طريقة سيبكوسكي التي قامت بجدولة بسيطة لعدد الأنواع المسجلة في المنشورات العلمية لفترات معينة للزمن الجيولوجي الماضي. والمفاجئ للجميع تقريباً هو أنّ النتائج الأولى لهذا الجهد كانت مختلفة جذرياً عن الرأي الذي كان مقبولاً لفترة طويلة.

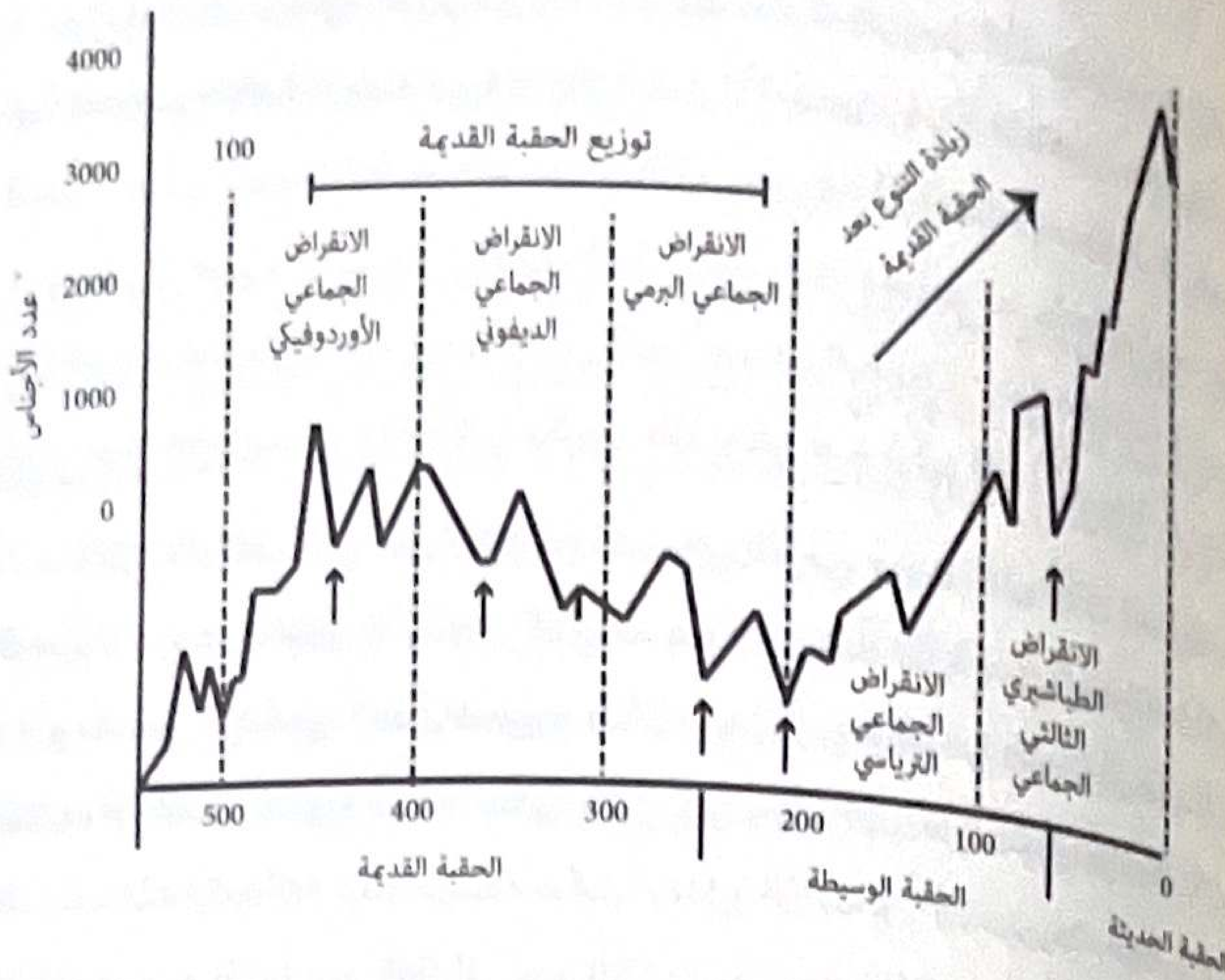
وجدت تحليلات مجموعة مارشال - ألروي أن التنوُّع في الحقبة القديمة كان تقريباً التنوُّع نفسه الذي كان في منتصف الحقبة الحديثة. والارتفاع المفاجئ في الأنواع الذي

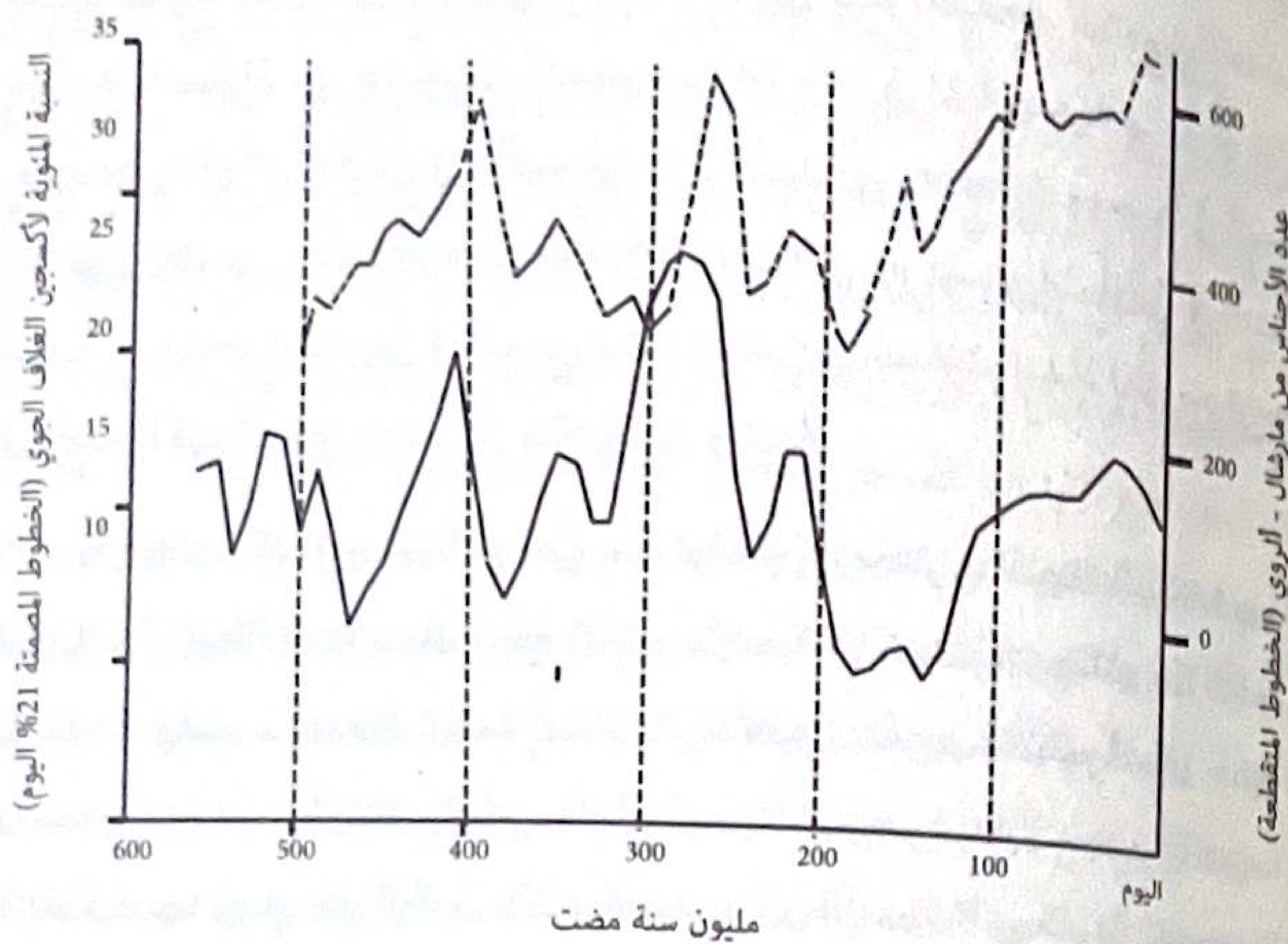
افتُرض لفترة طويلة جداً بأنه سبب التنوُّع عبر الزمن، لم يقم عليه دليل في هذه الدراسة الحديثة، وكان لهذا مقتضياته الصارخة: ربما كنا قد وصلنا إلى الحالة المستقرة للتنوُّع منذ مئات الملايين من السنين. ربما بلغ التنوُّع ذروته باكراً في تاريخ الحيوانات، وعلى نقيض الآراء كلها منذ زمن فيليبس، فقد بقي في حالة مستقرة نسبياً منذ ذلك الحين، أو ربما يكون بالفعل في تناقص. وبينما كانت ابتكاراتٌ جديدةٌ عديدةٌ (مثل التكيف الذي سمح بتطور النباتات الأرضية والحيوانات) بالتأكيد قد تسبّبت بوجود أنواع جديدة عديدة أضيفت إلى مجمل التنوُّع الأحيائي الكوكبي، فربما صار عدد الأنواع على الكوكب ثابتاً تقريباً في وقت متأخر من زمن الحقبة الأولية.

وهكذا، ففي أعقاب الانفجار البدئي للتنوُّع في الكامبري الباكر، زاد التنوُّع الحيواني أضعافاً مضاعفة ليصل التوازن خلال الحقبة الأولية ومن ثم انهار في نهاية البرمي، لتتلو ذلك نزعة إجمالية نحو زيادة التنوُّع، لكن تخللتها فترات قصيرة مهمة من انخفاضات التنوُّع - الانقراضات الجماعية - كانت خمسة منها خصوصاً متعاقبةً. وبينما أدى كل من هذه الانقراضات الجماعية إلى خسارة كبيرة في الأصناف Taxa، فقد تلتها كلها زيادات في معدلات تشكل الأنواع أدّت إلى مستويات ليست فقط مساوية للتنوُّع الأصلي السابق لحدث الانقراض فحسب، بل تجاوزته في كل مرة.

ويوحي هذا التاريخ أن المصفوفة المعقدة من العوامل المسببة للتنوُّع والانقراض على حدٍّ سواء هي المسؤولة عن النمط الملاحظ لتنوُّع البشائر (دهر الحياة الظاهرة). ومن بين العوامل المحتملة العديدة التي يُتذرع بها لشرح الزيادات الملحوظة في التنوُّع نذكر الابتكار التطوري، واستعمار مواطن فارغة سابقاً أو لا يمكن الوصول إليها، ووجود موارد جديدة. أما العوامل الكبرى المستشهد بها لانخفاض التنوُّع؛ فهي التغيرات المناخية، أو نقص الموارد أو مناطق السكن، أو منافسة بيولوجية جديدة أو الافتراس، أو أحداث خارجية مثل اصطدام الكويكبات.

لقد عرف علماء الجيوكيمياء منذ أمد بعيد أن تراكيز ثاني أكسيد الكربون ومستويات أكسجين الغلاف الجوي تبدي نزعات ارتبطت عكسياً فيما بينها: عندما ترتفع تراكيز الأكسجين؛ ينخفض عادة ثاني أكسيد الكربون. وبينما يصعب فهم الكيفية التي يمكن بها لتغيير مستويات ثاني أكسيد الكربون إلى تراكيز ليس لها أثر بيولوجي مباشر صغير في كائنات حية فردية، أو لا يكون لها أي أثر، أن يعزز بطريقة ما التنوُّع أو يثبّطه؛ لذا فمن المعقول جداً اقتراح أن هذا ليس أثر تغيير ثاني أكسيد الكربون وحده، بل هو في الواقع المزيج بين تغير تراكيزه وتغير مستويات الأكسجين، هذا التغير الذي تأثر بمعدلات حرارة العالم.





المخطط العلوي: مسار تنوُّع الحيوانات البحرية اللافقارية من العصر الكامبري فصاعداً كما اكتشفها جاك سيكوسكي، واستندت نتائجه إلى بحث مكتبي طويل واستثنائي، وهي تشير إلى أن أعداد الأجناس تزايدت بسرعة في الحقبة الأولية ثم استقرت، إلا أنها انخفضت بالانقراض الجماعي البرمي. ورأى بعد ذلك ارتفاعاً ضخماً في الأعداد العامة حتى اليوم. فالمخطط السفلي: تظهر هنا مستويات الأكسجين وفق نموذج روبرت بيرنر Robert Berner مع تقديرات أحدث (أكثر من سيبيكوسكي) للأعداد العامة الحيوانية نشرها جون الروي Jhon Alroy وآخرون. ولاحظ الارتباط القوي بين ذروة مستويات الأكسجين (العالية والمنخفضة) ومسار أعداد الحيوانات (عن: بيتر وورد Peter Ward، نتائج غير منشورة).

الماء البارد يحتجز كمية أكبر مما يحتجزه الماء الدافئ من الأكسجين. وفي العالم البارد، وهو بالفعل ذو مستويات عالية من الأكسجين، نادراً ما تتعرض الحياة في البحر للخطر بسبب النقص الشديد في الأكسجين. وعلى العكس من ذلك، ففي عالم دافئ، حيث الأكسجين بالفعل قليلاً نسبياً، فإن معظم مسطحات المياه غير المتدفقة ستصبح راكدة سريعاً. وليس فقط أحواض البحيرات - فالمحيطات الكبيرة أيضاً ستخضع لهذا في عالم دافئ، يكون عالماً يرتفع فيه تركيز ثاني أكسيد الكربون.

تقترح البيانات حتى الآن أن التنوُّع التصنيفي العالمي عموماً (على الأقل للحيوانات البحرية) مرتبط بمحتوى الأكسجين الذي قد يكون متوقعاً؛ لأنَّ تحمّل الحيوانات كلها لظروف نقص الأكسجين تحمّلٌ ضعيف. ولكن ما لم يكن متوقعاً هو ظاهرة أن معدلات النشوء (المقاسة بالأنواع أو بالأجناس، التي هي مجموعات من أنواع مرتبطة كلها بالسلف المشترك ذاته) تبدو مرتبطة عكسياً بتراكيز الأكسجين. فالمستويات العالية من النشأة المميزة للفترة من 545 إلى نحو 500 مليون سنة (الانفجار الكامبري) حدثت خلال فترة مطولة من مستويات أكسجين بين 14 و16 في المئة مقارنة بـ 21 في المئة حاليا. والارتفاع الدراماتيكي في الأكسجين خلال السيلوري Silurian، ومجدداً في العصر الكربوني (الفحمي) Carboniferous period، يتوافق مع المستويات الأدنى في النشأة العامة. وانخفاض الأكسجين في البيرمي يرتبط بارتفاع في معدلات النشأة لكن مع تراجع في العدد الكلي للأنواع. ويبدو أن هذه إشارة واضحة.

وأوقات الأكسجين المرتفع هي مثل أوقات الازدهار في اقتصاد البلاد. ويوجد القليل من البطالة والأعمال تنجح وتبقى مزدهرة - لكن لا يُفتتح كثير من الأعمال الجديدة. وعلى ما يبدو، ترتبط البدايات بالأوقات العصيبة؛ تظهر أفكار جديدة ومخاطر جديدة في أوقات اليأس. وعلى الرغم من وجود بدايات جديدة عديدة، فالقليل منها نجح، وفي الوقت ذاته، فالعديد من الأعمال التي كانت تنجح خلال الأوقات الجيدة تبدأ بالتراجع بمعدل أعلى من أي وقت مضى في الأوقات العصيبة.

نرى في ذلك تفرعاً ثنائياً: تظهر أعمال جديدة أكثر، لكن معظمها تفلس وتختفي سريعاً جنباً إلى جنب مع العديد من الأعمال الناجحة سابقاً. ومن ثمَّ دوران المال يقل أيضاً، وينهار العدد الكلي للأعمال. والشيء ذاته يبدو صحيحاً بالنسبة إلى الأنواع الحيّة، فالأكسجين العالي يعني أوقاتاً جيدة: أعداد ضخمة من الأنواع ولا

بأي شيء أكثر حداثة. وعندما ينخفض الأكسجين، تموت الأنواع بمعدل أسرع من أن يسمح باستبدالها، وعلى الرغم من ذلك يبقى الرقم الفعلي للأنواع المستجدة أعلى منه في أوقات الأكسجين العالي.

هناك العديد من الأمثلة، وأحد أفضلها هو أنّ الارتفاع طويل الأمد في الأكسجين بدءاً من العصر الجوراسي وحتى العصر الحديث ترافق على حدّ سواء مع انخفاض طويل الأمد في معدلات النشأة وارتفاع هائل في التنوُّع. فما التصاميم الجذرية الجديدة الظاهرة؟ طيور وثدييات وزواحف وبرمائيات - إنّ أشكال الحقبة الحديثة كلها هي تغيرات طفيفة لمخططات الأجسام التي نشأت في الأوقات الصعبة بالحقبة القديمة أو الحقبة الوسطى، أوقات الأكسجين المنخفض. ولم تظهر الديناصورات (المثال الأفضل على الابتكار الجذري الذي يولد مباشرة من الأكسجين المنخفض) في الحقبة الحديثة.

يستند الإدراك بأنّ توليفة الأكسجين المنخفض وثاني أكسيد كربون المرتفع قد حفزت تشكل الأنواع في الماضي عبر تشكيل استحداث تطوري، في الوقت نفسه الذي شهد زيادة واسعة في معدلات الانقراض، إلى أساس بيولوجي راسخ. والأثر الصافي هو خفض الأنواع خلال الفترات منخفضة الأكسجين. وانخفاض تراكيز الأكسجين المصحوب بارتفاع في درجات الحرارة هو النمط الأسوأ من اللكمة الثنائية؛ لأنّ التكيف مع البيئات الأسخن منخفضة الأكسجين ليس حلاً سريعاً أبداً. فالمزيد من الشعر والمزيد من الريش والمزيد من دهون الجسم يمكنها مواجهة مشكلة زيادة البرد، لكن البقاء بحالة البرد أصعب كثيراً ويتضمن تغييراً تطورياً أكثر عمقاً بكثير. ويصح ذلك حتى أكثر في الحيوانات التي تحاول التعامل مع البقاء على قيد الحياة في وضع ينخفض فيه الأكسجين أكثر من أي وقت مضى؛ لأن التكيف مع مستويات أكسجين أقل هو حتماً تغير عميق ويجب أن يحدث في أجهزة متعددة الأعضاء، من صبغات الدم إلى أجهزة دورية أكثر كفاءة إلى رئات أو خياشيم أفضل.

في عام 2009 لفت بوب بيرنر Bob Berner (من جامعة ييل) أنظارنا إلى الوجه الأكثر غرابة للأكسجين وعلاقته بالتنوُّع، فقد نبّهنا إلى ما رآه تشابهاً عميقاً بين آخر منحنى رسمه لتبدلات الأكسجين خلال دهر البشائر Phanerozoic وأحدث منحنى للتنوُّع عندها قدمته مجموعة جون ألروي. وقد عرضنا هذين المنحنيين في شكل بصفحة

سابقة من هذا الفصل. وبينما يوجد ارتباط مباشر طفيف بين تراكيز الأكسجين والتنوّع عندما تُقسَم إلى وحدات زمنية مدتها عشرة ملايين سنة، يظهر ارتباط مذهل بين التغير في أكسجين الغلاف الجوي عند رسم الخط البياني لعلاقته مع التغير في التنوّع خلال وحدات الزمن ذاتها (عشرة ملايين سنة). وعلى سبيل المثال، فالارتباط بين التغير في أكسجين الغلاف الجوي كنسبة من محتوى غازات الغلاف الجوي الإجمالية من 230 إلى 220 مليون سنة مضت، والمرسومة بالمخطط البياني مقابل التغير في التنوّع العام خلال الفترة الزمنية نفسها، موثوق به بشدة -وبكلمات أخرى، لم يكن ذلك من قبيل المصادفة. فالنتائج قوية جداً بالفعل من وجهة النظر الإحصائية.

وإحدى النواحي الأكثر إثارة لهذا هي أنه منذ تقديم كلا النموذجين، كانت نتائج نموذج مجموعة برنر (وغيرها كذلك)، التي تقدّر تراكيز الأكسجين وثاني أكسيد الكربون في الماضي، مثيرة للجدل. وتماثلها في ذلك منحنيات ألروي المختلفة، وتأتي كل مجموعة من النتائج (تعطي الأولى قيم الأكسجين وثاني أكسيد الكربون، والأخرى الأعداد المقدرة للأجناس الحيوانية عبر الزمن) من نماذج وردت من مدخلات مختلفة كلياً. ولم تكن أي قيمة من القيم العديدة المدخلة في نموذجي GEOCARB [نموذج رياضياتي لتقدير تراكيز الأكسجين وثاني أكسيد الكربون في العصور الماضية] وGEOCARBSULF [نموذج رياضياتي لتقدير تراكيز الأكسجين وثاني أكسيد الكربون والكبريت في العصور الماضية]تقدّم شيئاً عن عدد الأنواع التي كانت موجودة في أي وقت معين. وبطريقة مماثلة، فنموذج ألروي مستقل تماماً عن القيم المستخدمة في نموذج ثاني أكسيد الكربون والأكسجين. ومن الصعب تفسير هذا الارتباط المذهل تقريباً على الرغم من أنه قد يكون مصادفة من الناحية النظرية. ولكن لا توجد مصادفة في العمل، ويبدو أن تراكيز الأكسجين وثاني أكسيد الكربون (وخصوصاً الأكسجين) هما الأكثر أهمية بين العوامل كلها التي أمْلت التنوّع الحيواني. والمنحنيان المستقلان بهذا الأسلوب يدعم أحدهما الآخر لجهة أكثر القيم العلمية أهمية: المصداقية.

الحشرات ومجموعات النباتات

من الواضح أنّ غزو اليابسة فَتحَ بوابة السدّ أمام التنوع والتفاوت كليهما؛ فهمُنا لمجمل التنوُّع للحياة عبر الزمن هو أن أنماط الحياة الموجودة على الأرض

الآن أكثر - من حيث الأنواع أو أي طريقة أخرى في جدولة التنوُّع - منها في أي وقت في الماضي. فهل هذا صحيح حقاً؟ وما التحيزات التي قد تكون موجودة؟

في كل علم جيد توجد فرضية البطلان Null Hypothesis، وهي هنا أنّ الحياة البحرية الحيوانية على الأرض بلغت المستويات الموجودة عليها في أيامنا الحالية منذ نهاية الكامبري. وهذه كانت وجهة نظر ستيفن جاي غولد في سبعينات القرن العشرين، وما إذا كان حقاً يعتقد به هو أمر غير ذي أهمية: إنّ تبنّيه لهذه القضية أنتج علماً أكثر قوة.

الجواب عن السؤال المتعلق فيما إذا كان التنوع قد ازداد بسرعة أو ببطء حتى وصل إلى المستويات الحالية، يرتبط بإمكانية الحفظ النسبي لأحياء العصر الحديث مقارنة بتلك التي من الكامبري. فاليوم يوجد نحو واحد من كل ثلاثة حيوانات بحرية يمتلك أقساماً صلبة يمكن أن تنتج أحافير - مثل الصدفات والعظام والذيل القاسي (الدرع القرني). فماذا لو كان هذا العدد واحداً من عشرة خلال الكامبري؟ في مثل هذه الحالة، ربما تكون أعداد الحيوانات خلال الكامبري والمحيطات المعاصرة متساوية تقريباً. ويأتي أيضاً دعم لهذه الفكرة من عمل جاء بعد سيبكوسكي وقام به مارشال وألروي ليقدما نتائج نموذجهما الذي يظهر زيادات بعد الكامبري في التنوُّع، لكنه لا يلحظ الانطلاق الانفجاري للأصناف الحيوانية ما بعد البرمي، والذي عثر عليه سيبكوسكي.[10] فقد انتهى عمل ألروي منذ ذلك الحين عدة مرات على بيانات جديدة.[11]

وتوجد مصادر أخرى للتحيز أيضا فضلاً عن افتراضات مشكوك بها ربما كان هدفها الوصول إلى نماذج التنوُّع عبر الزمن. فعلى سبيل المثال، ماذا عن أحجام العينات غير المتساوية التي درست؟ لاحظ المنتقدون لمشاريع التنوُّع عبر الزمن وجود كميات من الصخور لأخذ العينات من أواخر الحقبة الحديثة أو الحين البليستوسيني أكثر بكثير مما يوجد من الكامبري. وإضافة إلى ذلك، فعلماء الأحافير الذين يدرسون أحافير أواخر الحقبة الحديثة والبليستوسيني أكثر بكثير من المحترفين الذين يجرون دراسات على صخور وأحافير من زمن الكامبري. وقد قدّم كلٌّ من أندرو سميث Andrew Smith من المتحف البريطاني،[12] ومايك بينتون[13] من جامعة بريستون، وشانان بيترس[14] Shanan Peters من ويسكونسن، بشكل مستقل، عملاً لافتاً في هذا الجانب.

لقد أظهرت أعمالهم أنّ اختباراً بسيطاً جداً أثبت أنه كانت هناك زيادة في أصناف الحيوانات البحرية (بأنواعها أو أجناسها أو فصائلها) منذ الانفجار الكامبري وجاء الاختبار من دراسة عدد أحافير الأثر عبر الزمن. وأحافير الأثر هي نتائج للنشاط الحيواني، كما رأينا في الفصل الذي يتحدث عن الانفجار الكامبري، وكل أثر مختلف موجود في الطبقات أتى من مخطط جسم مختلف قليلاً. ويعكس نموذجهم الخاص بالتنوّع السجلّ من أحافير الجسم. ومن المتفق عليه الآن أنّ النموذج الشامل للتنوّع، الذي اعترف به علماء أحافير اللافقاريات لمدة طويلة، أتاح بالفعل نظرة دقيقة بشكل معقول حول كيفية تنوع الحياة على الأرض.

ومع نهاية العصر الديفوني، استوطنت الحياة البيئات البحرية الكبرى من المحيطات الأضحل إلى الأعمق. فهذا التنوع البحري كان على وشك التعتيم عليه من قبل التنوّع الذي سيثبت في النهاية أنه أكثر بكثير مما سبق، خالقاً المجموعة الأضخم من أنواع النباتات والحيوانات على الأرض: تنوُّع الحياة على اليابسة.

الانقراض الجماعي الأوردفيشي

كان العصر الأوردفيشي أيضاً الوقت الأول لما يُدعى الانقراضات الجماعية الخمسة الكبرى التي شملت الحيوانات والنباتات. وكانت هناك بالتأكيد انقراضات جماعية قبل الحدث الأوردفيشي، خلال حدث الأكسجة العظيم وحلقات أرض كرة الثلج المختلفة كأمثلة. ولكن الحيوانات كانت في خضم التمايز بمعدل عالٍ عندما خفَّض شيء ما هذه الزيادة في التنوُّع إلى النصف. والتوقع الأفضل هو أن ذلك حدث عندما خضعت الأرض لفترة جليدية مصغّرة حوّلت الحيود المرجانية الباكرة إلى حطام ميت من الأنقاض بسبب انخفاض الحرارة المفاجئ. إلاّ أنّ هذا لا يزال لغزاً لأن الانقراض يشمل خطوتين متمايزتين في إحدى نهايتي المرحلة الأخيرة من الزمن الأوردفيشي، وأطلق على هذا اسم التجمد الهيرنانتي Hirnantian glaciation.

وتوجد اقتراحات أخرى أكثر غرابة حول سبب الانقراض الجماعي الأوردفيشي، وأكثرها إثارة هو أنّ الأرض ضُربت خلال الأوردفيشي بعصفة عملاقة من أشعة قاسية قادمة من الفضاء بين النجمي تُدعى انفجار أشعة غاما Gamma-ray burst

[15] وهذا هو السبب المحتمل الأكثر دراماتيكية، وعلى الرغم من عدم وجود حتى ولو ذرة دليل واحدة لدعمه، فقد نشره العديد من الصحفيين. وقبل عام 2011 كان السبب المقبول لهذا الانقراض الجماعي هو غياب أي سبب مقبول.[16] وقد اختارت معظم التفسيرات نوعاً من حدثٍ تبريدٍ سريع، وإحدى الأفكار السائدة هي أنه ربما تسببت تدفقات بركانية بأن يصبح الغلاف الجوي معتماً بهباء الكبريت الجوي[17] بنمط مشابه لذلك الذي تلا انفجار بركان كراكاتوا Krakatoa volcanic explosion في بدايات القرن التاسع عشر، عندما عاشت أوروبا "سنة كاملة بلا صيف". إلاّ أنّ علماء الجيولوجيا والجيوكيمياء في كالتيك Caltech[18] هاجموا مؤخراً مشكلة التجمد الأوردفيشي المتأخر هذا من تسلسل محفوظ بشكل رائع في الصخور في جزيرة أنتيكوستي Anticosti، الجزيرة الكندية النائية في خليج سانت لورانس التي كانت تقع في المنطقة المدارية. وباستخدام نمط جديد من موازين الحرارة الكيميائية الجيولوجية، كانوا قادرين على الحساب النسبي لحجم الجليد ودرجة الحرارة بدقة لا مثيل لها. والمفاجأة هي أنهم وجدوا أنه بينما تغير حجم الجليد ببطء فقط قبل الزمن الهيرنانتي وبعده، وبقيت درجة الحرارة المدارية حارة جداً لكن معقولة (32-37 درجة سيليزية)، كان هناك تبدل حاد في كلتا النهايتين ترافق مع خطوتي الانقراض الجماعي. فقد هبطت درجات الحرارة المدارية نحو 5 إلى 10 درجات سيليزية، وارتفعت مستويات حجم الجليد العالمي إلى مستويات شابهت تلك التي كانت في الحد الجليدي الأقصى الأخير (البليستوسيني) أو تجاوزته، وأظهرت نظائر الكربون ارتفاعا؛ مما يوحي باضطراب كبير في دورة الكربون العالمية - من المحتمل أن كميات أكبر من الكربون العضوي دفنت في هذه الحالة.

وهذه المعلومات الجديدة تضيّق آليات القتل الحقيقية لهاتين النبضتين الانقراضيتين إلى احتمالين اثنين: إما تغير سريع في المناخ أو تغير سريع في مستوى المحيطات في أرجاء العالم كلها. وفي ورقة متابعة، استخرج أعضاء الفريق نفسه[19] قاعدتي بيانات رقمية ضخمة لأمريكا الشمالية؛ تظهر الأولى التوزعات الأحفورية، وتعرض الأخرى حجم الصخور المتوفرة للبحث فيها عن الأحافير (تصحيح ضروري للاكتشافات الأحفورية!). وقد وُجد أن كلتا العمليتين تفسران الانقراضات - وأشير إلى فقد الموائل بسبب انخفاض مستوى البحر والهبوط المفاجئ في درجات الحرارة

كعناصر كبرى مساهمة في الفناء. إلاّ أنه ليس واضحاً ما إذا كانت هذه هي القصة الكاملة؛ فما يثير الدهشة هو أنّ توقيتات الاضطرابات المناخية، بما في ذلك الارتفاع في نظائر الكربون، مشابهة لبعض الأحداث المُحرِّضة بانحراف القطب الحقيقي المذكورة في الفصول السابقة. وقد يكون ذلك عبارة عن تبدل قصير وحاد في الأقطاب الحقيقية True Polar Wander كان قد أثار فترة قصيرة من التبريد العالمي لينتج ربما، دوراً جليدياً لفترة قصيرة الأمد. ويبقى هذا الأمر غامضاً، وسيبقى موضوعاً للبحث. إنه بالتأكيد ليس الشرح التقليدي، وهو في الواقع شرح جديد – وهو الوعد في عنواننا لهذا الكتاب.

10

تيكتاليك وغزو اليابسة: ما بين 475-300 مليون سنة مضت

على مرّ العقود كانت نقطة الخلاف الرئيسة بين التطوريين ومعارضيهم من مناصري مبدأ الخلق الذين لا يعترفون بأن الأنواع تتطور من بعضها هي الاختلاف المفترَض بين أولِ البرمائيات وأحدثِ سلف معروفٍ لها بين الأسماك، إذ تبدو أحافير الأسماك «سَمَكيّة» الشكل إلى حد بعيد، في حين تبدو أحافير البرمائيات الأولى غيرَ شبيهة بالأسماك بما يكفي لاسترضاء المُشكِّكين. وفي الواقع كانت هناك قيمة لجانب من هذا النزاع: إذ إن أقدمَ أحافير البرمائيات المتّفقِ عليها، حتى وقت قريب، تعود إلى كائن من العصر الديفوني[1] يُدعى إكثيوستيغا *Ichthyostega* (ويعني الاسم السمكةَ البرمائيةَ) له جسم يشبه جسم السمكة (بما في ذلك ذيل سمكة طبيعي تماماً) وأربع أرجل، كما اتضح أن السلف المباشر لهذا الكائن له جسم مماثل ولكن دون أرجلٍ. وتنتمي هذه السمكة التي اعتبرها علماءُ الأحافير الجدَّ الحقيقيَّ للإكثيوستيغا وغيرِها من فقاريات اليابسة الأولى (أو على الأقل تلك التي تقضي جزءاً من حياتها على اليابسة) إلى مجموعةٍ تُعرف بـ لحميات الزعانف Sarcopterygians، وهي كائنات لها زعانف حولها فصوص لحمية[2] كانت هي المصدر لتطور الأطراف. ويُعتقد أن الأُحفورة الحية لاتيميريا *Latimeria* (سمك السيلوكانث Coelacanth) تشبه إلى حدٍّ ما السلف المباشر للحيوانات الأولى التي تحولت في النهاية إلى البرمائيات، بما فيها الإكثيوستيغا. وتساءلَ النقّاد: «أين هي الحلقات المفقودة؟» ولكنّ اكتشافاً أحفورياً في القرن الحادي والعشرين بدّل كل ذلك، إذ اكتُشفت أُحفورة من العصر الديفوني في الطبقات المتجمدة لخطوط العرض العالية في المنطقة القطبية الشمالية، أُطلِق عليها اسمُ تيكتاليك *Tiktaalik*، كانت انتقاليةً إلى درجةٍ دفعت مكتشفيها[3] إلى تلقيبها بـ Fishopod (السمكة ذات الأقدام). ويُعتبر هذا الاكتشاف واحدة من أكثر المراجعات ذات الشأن لما ندعوه تاريخ الحياة، ليس فقط في ملء فجوة كبيرة في إدراكنا (في السجلّ الأحفوريّ بين الفقاريات المائية وفقاريات اليابسة) بل أيضاً في المساعدة على ترسيخ نظرية التطور ككل.

وهذه الأُحفورة الكبيرة التي اكتشفها في المنطقة القطبية الشمالية بكندا فريقٌ من الباحثين الدوليين قاده نيل شوبين Neil Shubin من جامعة شيكاغو أثبتت أنها الترياق

المثالي للمشكّكين من أتباع نظرية الخَلْق. وبعد أن خُلّصت أخيراً (وبعد جهد كبير) من غلافها الذي يشبه الناووسَ (التابوت الحجري) المكوَّنَ من الصخور الرسوبيةِ التي كانت تحتجز عظامها، اعتُبِرت أول أحفورة تيكتاليك سمكةً كاملةً ذات خياشيم وحراشف. كما تبيّن أن لها رأسا مسطحا وزعانفَ ذات عظامٍ شعاعيةٍ رفيعةٍ وهي الشكل المألوف أكثر من غيره من زعانف الأسماك. ومع ذلك، في حالة هذه السمكة الجديدة، وُجد نوع من العظام الداخلية القويةِ الضرورية لحيوانٍ كبير الحجم كهذا (إذ يبلغ طول هذه العينة ثلاثة أقدام تقريباً) كي يرفع جسمه إلى الأعلى في المياه الضحلة باستخدام زعانفه التي تشبه الأطرافَ، وذلك كما تفعل الحيوانات ذاتُ الأربع أرجل. وبوجود هذه الزعانف الغريبة والرأس البرمائي (بل الشبيه برأس التمساح) تبيِّن توليفةُ الملامح التي يتصف بها التيكتاليك عمليةَ الانتقالِ التطوريِّ الكامل خطوةً فخطوة من الأسماك إلى خطة الجسم المميزة لرباعيات الأرجل.[4]

إن الظهور الأول للفقاريات على اليابسة كان الحدثَ الأكثرَ دراماتيكية لسلسلة من الغزوات التي قامت بها الحيوانات المائية، والنباتات أيضاً. وعلى الرغم من أن أغلبها ملاءمة لنا، إلا أننا نحن الفقاريات كنا آخر من خرج من الماء، إلى اليابسة وانضم إلى القائمة. وكي نروي الحكاية بالترتيب نبدأ أولاً بالنباتات.

النباتات تغزو اليابسة

يمكن القول إنّ أعظم حدثٍ فرديٍّ في تاريخ الحياة كلها، باستثناء تشكل الحياة الأولى بحدّ ذاتها، هو ابتكارُ الحياة للبناء الضوئي المُطلِقِ للأكسجين. وكان هذا ما سمح للحياة بالانتقال من موائلها المظلمةِ الشديدة الرطوبة ككتلة حيوية ضعيفة الثبات لتملأ المسطحات المائية الأكثر سطحية في البحار وفي المسطحات المائية ذات المياه العذبة على حدٍّ سواء، وذلك بالاستفادة من أكبر مصدر للطاقة في المنظومة الشمسية ألا وهو الشمس. ونتيجة لذلك، ولو أنه من المنتجات الجانبية غير المقصودة؛ لتغير الغلاف الجوي لكوكبنا جذرياً إلى غلاف ذي تراكيز أكسجين عالية لدرجة أدت إلى عاقبة غير مقصودة أخرى شكلت الخطرَ الأعظم الذي يهدد النباتات، وهو الحيوانات العاشبة. ومهما كانت هذه التغيرات الناتجة من النباتات المائية مهمة للحياة على الأرض، فإن تغيراتٍ أكثرَ جذرية طرأت على كوكبنا عندما طورت النباتات وسائلَ مكّنتها من التحرّر من أغلالها المائية واستعمار اليابسة. وفي

لمح البصر بالنسبة إلى تاريخ الأرض إلى يومنا هذا، وخلال مدة زمنية تعادل أقل من واحدٍ في المئة من عمر الحياة نفسها، فقد غيّر هذا الغزو الكبير لليابسة من قبل النباتات كلّ القواعد وكذلك تاريخ الحياة على كوكبنا.

وكما رأينا في فصل سابق، توجد الآن أدلة وفيرة على أن بعض أنواع الكائنات الحية البدائية القادرة على البناء الضوئي وجدت طريقةً للنمو على سطوح اليابسة قبل مئات الملايين من السنين من ظهور الحيوانات الأولى، وفي الواقع قد تكون سبباً أساسياً في آخر حادثة أرض كرة الثلج بين 700 -600 مليون سنة مضت. ولا يوجد لدينا أدنى فكرة عمّا كانت عليه، لربما كانت ببساطة عبارة عن سيانوبكتيريا أو ربما كانت عندها آليات للتلاؤم فعلاً مع الحياة على اليابسة كالقدرة على التثبت في المكان والحصول على المغذيات والتكاثر والحصول على الماء والاحتفاظ به. ويبدو أن الطحالب الخضراء وحيدة الخلية التي لا تزال موجودة حتى الآن هي المرشّحة لذلك.

ولكن حتى هذه النباتات ربما لا تكون أول من خرج من البحر منذ 700 مليون سنة، إذ تزايد عدد علماء الجيوبيولوجيا الذين استنتجوا أن الحياة على اليابسة كانت موجودة قبل ذلك بكثير، وهي الجراثيم وحيدة الخلية القادرة على البناء الضوئي التي انتقلت من الماء إلى اليابسة كانت موجودة منذ نحو 2.6 بليون سنة. وإن كانت هذه هي الحال، فقد وُجد المستعمرون الأوائل هؤلاء منذ وقت طويل جداً عندما صعدت النباتات والحيوانات «العليا» إلى اليابسة أيضاً.

ومن المعلوم أنه خلال أقل من مئة مليون سنة من ظهور الحيوانات في البحر قام بعض أنواع الطحالب الخضراء، التي لا تزال تعيش على الأرجح في الماء العذب، بتحطيم قيود المعيشة في الماء فقط وهاجرت إلى اليابسة آخذة بالتطور السريع بدءاً من نباتات عديمة الأوراق شبيهة بالغُصينات، ولا تختلف عن العديد من أنواع الأشنات المعروفة في أيامنا إلى نباتات عملاقة حقيقية، وذلك بفضل واحد من الابتكارات العظيمة للتطور هو الأوراق.

ومنذ نحو 475 مليون سنة، عندما بدأ كثير من التغيرات التطورية بالحدوث في الطحالب الخضراء المائية، أتاحت لها إمكانية الحصول على المغذيات - والأهم من ذلك القدرة على التكاثر - في مزيج من الهواء والتربة وليس كلياً في الماء، وحتى نحو 425 مليون سنة مضت حين أظهر السجلّ الأحفوري بقايا جميلة لا شك فيها للنباتات الوعائية الحقيقية Vascular plants الأولى (أي ذات الجذور والسيقان)،

كانت هذه التغيرات الضرورية بطيئةً، حدثت خطوة فخطوة، ولا يمكن رؤية أغلبها في السجلّ الأحفوري. وقد استغرق تطور هذه النباتات الأولى الصغيرة الشائكة عديمة الأوراق إلى أولى النباتات التي تحمل أوراقاً حقيقية أربعين مليون سنة أخرى. ولكن حالما ظهرت الأوراق الأولى، فقد أطلق العنان لحدوث ثورة عظيمة من التغيرات السريعة. ووصل ارتفاع الأشجار إلى 25 قدماً [أكثر من 7.5 متر] منذ نحو 370–360 مليون سنة مضت.

وقد استغرق الأمر قرابة مئة مليون سنة كي تتحول النباتات متعددة الخلايا التي غزت اليابسة من الأشكال البحرية الصغيرة إلى غابات تغطي العالم، والتي كانت قد تشكلت بحلول نهاية العصر الديفوني. وكان تأثير هذه النباتات في اليابسة، من إحدى النواحي، أكثرَ أهمية بكثير من تأثير الميكروبات التي بقيت سائدة قبل فترة طويلة، إذ غيّر غزو النباتات متعددة الخلايا لليابسة كلياً من طبيعة التضاريس والتربة. كما غيّر من شفافية الغلاف الجوي، وكلما انتشرت النباتات أكثر على اليابسة تغيرت أشكال التضاريس الوحيدة على سطح الأرض حتى ذلك الوقت، وهي الكثبان الرملية التي لا تركن ومناطق الغبراء الهائجة، متحولة إلى تربة. وبدأت الجذور تثبّت الحصى والغبار بقدر أكبر بكثير مما فعلت البكتيريا سواء على شكل خلايا مفردة أم حتى صفائح رقيقة قليلة المتانة. وعندما كانت النباتات البدائية تنفق حيث نمت وتتفسخ بدأت تتشكل تربة أكثر فأكثر سماكة، وبدأت المناظر الطبيعية الصخرية الوعرة التي لطالما كانت تغطي الأرض تصبح ألطف. ومن الفضاء، فإن الهواء الحقيقي بحد ذاته صار أنقى؛ وصارت حدود القارات والبحار والأنهار والبحيرات الكبيرة مرئية لأول مرة من مسافات قصيرة وبعيدة على حدٍّ سواء.

غطّت الغاباتُ اليابسةَ بشكل شبه كامل في الديفوني المتأخَر، وغيّرت إلى حدٍّ بعيدٍ الطرقَ التي تسلكها الأنهار في الطبيعة. وبذلك تسببت النباتات في نهاية المطاف بارتفاع تراكيز الأكسجين الجوي إلى 30–35 في المئة وهي أعلى بكثير من النسبة التي يوجد بها اليوم (21 في المئة). وسمحت هذه التراكيز المرتفعة للأسماك اللارئوية ذوات الأطراف بالزحف من البحر والبقاءِ على قيد الحياة مئات الآلاف من السنين التي يتطلبها تطوير رئةٍ فعالةٍ تتنفس بالهواء. وقد اعتمد كل هذا الاستعمار والتغيير الذي أحدثته نباتات اليابسة على ابتكار تشريحي عظيم واحد وهو تطور الأوراق.

اليابسة مقابل البحر

انبثقت الحياة الحيوانية من البحر من خلال سلسلةٍ من الغزوات المتعاقبةِ أشبه بما تفعله الجيوش غيرُ المنسّقةِ المتشرذمةُ سيئةُ التسليحِ والتكيُّف: بأعداد قليلة من الجنود في كل غزوة يفنى معظمهم خلال العملية. والتفسيرُ المعتاد لهذ التاريخ تحديداً هو أن حدوثَ الغزوات كان نتيجة تطوّر الحيوانات أخيراً إلى مرحلةٍ أصبح عندها استعمار اليابسةِ أمراً ممكناً، والدافع لذلك هو وجود موارد غير مستغَلّةٍ ومنافسة وكائنات مفترسة أقل (على الأقل، لحين من الزمن). وبعبارة أخرى، فإن التقدم التطوري لمفصليات الأرجل والرخويات والحلقيات وأخيراً الفقاريات، وهي الشعب الحيوانية الرئيسة المشاركة في استعمار اليابسة، وصل أخيراً وبالمصادفة إلى مستويات من التنظيم سمحت لها بالخروج من الماء واستعمار اليابسة. غير أننا نرى أن الاستعمار الأول لليابسة من قِبل الحيوانات حصل بمجرّد ارتفاع تراكيز الأكسجين الجوي إلى مستويات تسمح بذلك.

دعونا ننظر أولاً إلى متطلّبات النباتات والحيوانات، أي التكيّفات التي تمكنها من العيش على اليابسة. ولنبدأ من النباتات لأنه دون وجود مصدر للغذاء على اليابسة لن تحاول الحيوانات الحصول على موطئ قدم على الأرض.

وأدى تطور النباتات قبل نحو 600 مليون سنة إلى تنوّع سلالات عديدة من النباتات متعددة الخلايا التي لا يزال بعضها مألوفاً بالنسبة إلينا: فالطحالب الخضراء والبنّية والحمراء هي أعضاء مألوفة في أيّ شاطئ بالعالم.[5] ولكنها كانت النباتات التي تطورت في مياه البحر، وكانت متطلبات الحياة، أي ثاني أكسيد الكربون والمغذيات، متوفرةً ومتاحةً لها بسهولة في مياه البحر المحيطة بها. وكذلك التكاثرُ، إذ كان بواسطة البيئة السائلة أيضاً. فقد تطلب الانتقال إلى اليابسة تغيراً تطورياً كبيراً في مجالات اكتساب ثاني أكسيد الكربون والمغذيات ودعم الجسم والتكاثر، واحتاج كل واحد من هذه إلى تعديل كبير على مخططات أجسام الأصناف المائية البحتة التي كانت موجودة. ولا يزال قسم كبير من هذا التاريخ مثيراً للجدل خاصة مع إدراك وفرة وتنوّع المجموعات المختلفة التي كانت موجودة في دهر الطلائع وحتى قبل أرض كرة الثلج في تلك الحقبة.[6] وعلى الرغم من أن الصحافةَ تهوى كلَّ ما يوصَف بكونه «الأقدم» أو«الأكبر» أو أيِّ مفهومٍ مطلَقٍ آخر، إلا أنه لا توجد علاقة بين سرعة اكتشاف قِدم نباتات اليابسة وانتماءاتها البيولوجية وبين الحاجة إلى تأريخها بصورة أكثر دقة. وعلى سبيل المثال، فقد أُعلِن عن اكتشاف «أقدم»

نباتات اليابسة في عام 2010 بناءً على اكتشافات أحفورية جديدة في الأرجنتين. ونتبيّن أن هذه الأحافير تعود إلى الطحالب الكبدية وأرّخ عمرها 472 مليون سنة. ولكنّ احتمال الخطأ في أي تأريخٍ مماثلٍ اعتماداً على صخرة قديمة كهذه كبيرٌ. وفضلاً عن ذلك، فإن هذه نباتات «وعائية» قديمة فعلاً، وهي نباتات لها نُظُم نقل داخلية معقدة، وفي مثل هذه الحالة فإن تعريف ماهية النبات يعقّد القصة، إذ كان هناك كثير من مخططات الأجسام وتنوّع الأنواع للكائنات حية القادرة على البناء الضوئي والتي يمكن أن نسميها نباتات قبل 472 مليون سنة بوقت طويل. ويعتقد العديد من علماء الأحياء القديمة (الباليوبيولوجيا) أن مجموعةً واسعةَ التنوع من الفطريات والميكروبات الخضراء التي تقوم بالبناء الضوئي، وكذلك النباتات متعددة الخلايا كانت موجودةً على اليابسة في وقتٍ أقدم مما هو معتقَدٌ اليوم، وأنه حتى منذ بليون سنة وُجِد تجمُّعٌ غفيرٌ مفعمٌ بالحيوية يمكن أن ندعوه نباتات، إذا أضفنا الأشنات والفطريات وصفائح الميكروبات الخضراء التي تكسو المساحات الرطبة والمستنقعات.[8]

وكانت مجموعة الطحالب الخضراء، النباتات الكاريانية Charophycease، هي أسلاف نباتات اليابسة متعددة الخلايا القادرة على البناء الضوئي، والتي يتفق الجميع على كونها «نباتات» حقيقية، وهي ذلك النوع من الكائنات الحية التي يُحكى عنها في معظم القصص عن أقدم النباتات. وكان لابدَّ من التغلّب على العديد من العقبات، لعلّ أولاها مشكلة الجفاف. وسرعانَ ما تتنكّسُ الطحالب الخضراء التي تجرفها الأمواج إلى الشاطئ من موئلها تحت الماء وتموتُ؛ لأنها تجفُّ بسرعةٍ في الهواء إذ ليس لديها غلاف واقٍ. ولكنَّ هذه الطحالبَ تُنتجُ زيجوتات (لواقحَ تكاثرية) Zygotes ذات قشرة مقاومة قد تُستخدَم لتغليف النبات نفسه عند انتقاله إلى اليابسة. فتطور هذه القشرة التي تحمي الخلايا الداخلية للنبات المملوءة بالسائل خلَقَ مشكلةً جديدةً: أنها عطّلت إمكانية الحصول المباشر على ثاني أكسيد الكربون. أما في المحيط؛ فكان امتصاص الكربون مع ثاني أكسيد الكربون الذائب يَحدُث بسهولة عبر الجدار الخلوي. ولتحقيق ذلك تطور العديد من الفتحات التي تدعى مسامات، في نباتات اليابسة المتطورة حديثاً، كبوابات بالغة الصغر تسمحُ بدخول غاز ثاني أكسيد الكربون.

جسمُ النبات ينبغي أنْ يثبتَ في مكانه، وكانت نباتات اليابسة البدائية ترتكز على الأرجح بواسطة فطريات Fungi متعايشةٍ معها لعدم وجود أي تمايز في

أشكالها العليا. وإضافة إلى ذلك، فإن علاقة التعايشِ هذه أتاحت لها تأمين وسائل لاستخلاص الماء من التربة.

وخلق الانتقال إلى اليابسة أيضاً مشكلة الدعم، إذ تحتاج النباتات إلى مساحات كبيرة تواجه ضوء الشمس. وأحد الحلول هو أن تمتدّ النباتات على الأرض (في وضع مسطّح)، ويرجح أن أولى نباتات اليابسة كانت كذلك. ولا تزال الأشنات تستخدم هذا الحل حيث تنمو كالبساط فوق التربة. إن زيارة لليابسة الأوردفيشية ربما ستكون بمثابة زيارة إلى عالم الأشنات، حيث يبلغ طول أعلى "شجرة" في العالم ربع بوصة. لكنّ هذا الحل مقيّدٌ جداً، في حين يسمح النمو في وضع قائم بالحصول على المزيد من الضوء وخاصة في نظام إيكولوجي تتنافس فيه النباتات المنخفضة، واستخدمت النباتاتُ البدائية مواد متنوعةً أكثر صلابة تسمح بإنتاج السيقان الأولى وأخيراً جذوع الشجر. ولَربما كان ذلك مصحوباً بتطور نظام النقل من الجذور إلى الأوراق التي تطورت حديثاً. وأخيراً تطورت الجسيمات التكاثرية التي تستطيع أن تقاوم الجفاف لمدة طويلة لضمان التكاثر في بيئة اليابسة.

وحالما كَفلت هذه الابتكاراتُ استعمارَ اليابسة من قبل النباتات، ومع تكوين مقادير ضخمة جديدة من الكربون العضوي على اليابسة لأول مرة، سرعان ما لحقتها الحيوانات. وحفزت المواردُ الجديدةُ التطورَ الجديد. فإذا كان تطور النباتات الأرضية الأولى من مجموعة صغيرة من الطحالب الخضراء التي سادت في الماء العذب هو الرأي الأكثر قبولاً؛ فمن المؤكد أن ذلك التطور قد مضى دون كثير من الضجة الأحفورية أو الأدلة في السجل الأحفوري، تاركةً وراءها سجلاً أحفورياً مجزأً. وقد تطلّب نبش هذا السجل الأحفوري بالدرجة الأولى عملاً يشبه عمل المحقِّق السري (بالمعنى الحرفي والفلسفي).

وبدأت عملية استعادة السجل الأحفوري للنباتات البرية المعقَّدة الباكرة في مقال مؤثّر عام 1937، ونحن مدينون لزميلنا وصديقنا الرائع ومتقد العقل ديفيد بيرلينغ David Beerling من جامعة شيفيلد على كثير من المناقشة هنا، إلى جانب التاريخ العلمي. فقد عبَّر ديفيد في كتابه الثوري الكوكب الزمردي *The Emerald Planet* عن تذمّره من كون مجاله في تاريخ الأرض، وهو علم النباتات القديمة، «لا يحظى بالاحترام» بأسلوب لا يشبه أسلوب الدعاة، يشبه أسلوب رودني دانجرفيلد Rodney Dangerfield الهزلي. ولكنه محقٌّ تماماً، بمعنى أنه في حين كانت الديناصورات وصائدوها ينالون حصة الأسد (أو النسر؟) من الاهتمام العلمي ومن

الأمجاد، تبقى النباتات، في الواقع، أهمَّ مجموعة من الكائنات الحية على الأرض من ناحية تأثيرها في تاريخ الحياة حتى الآن. وأيُّ كتاب يتحدث عن التغيرات التي طرأت على كوكبنا نتيجة «تاريخ» الحياة ينبغي أن يكون فيه فصل واحد يتناول الحيوانات، وما تَبَقّى يجب أن يكون عن النباتات. وعلى أي حال، جاء معظم ما استخدمناه في كتابنا عن دور النباتات بصراحة من أعمال ديفيد ولا سيّما كتابه المذكور.

وقد نبدأ الكلام عن تاريخ نباتات اليابسة القديمة وكيفية استيلائها على النُظم الإيكولوجية الأرضية، وبذلك تغيرت طبيعة الحياة على الأرض بسبب تأثيراتها في درجة حرارة العالم وكيمياء المحيطات وموجودات الغلاف الجوي من عالم النباتات القديمة ويليام لاندر **William Lander**. إن لاندر هو العالِم الذي قام بالاكتشافات الأولى في هذا المجال، ووجد بقايا ما عُرف لاحقاً بأقدم أحافير نباتات اليابسة في صخور عمرها 417 مليون سنة في ويلز (في ذلك الوقت كانت هذه التواريخ غير معروفة على الإطلاق. وفي الواقع، فإن الأعمار المطلَقة التي نستخدمها الآن هي اكتشافات جديدة نسبياً). وفي حين اعتُقد أن أحافير ويلز التي يبلغ عمرها 417 مليون سنة هي أقدم سجلّات للنباتات البرية، سرعان ما بدأت أحافير أخرى بالظهور في صخور أقدم وأُرِّخ عمرها 425 مليون سنة في وقت لاحق واكتُشفت أيضاً في ويلز.

أُطلِق على ذلك النبات الأقدم اسم كوكسونيا *Cooksonia*. ومرَّت نباتات اليابسة انطلاقاً من هذه البدايات الباكرة بتشعُّبٍ تطوريٍّ طويل ولافت طال تأجيله. ومرت النباتات في الفترة الزمنية بين 425 و360 مليون سنة مضت بتشعب خاص بها على شاكلة الانفجار الكامبري الذي حدث للحيوانات؛ إلا أنه في هذه المرة كان الانفجار هو انفجار النباتات على اليابسة. ولكن وجهةَ النظر الأحدث تقول إن خلال أول ثلاثين مليون سنة على الأقل على ظهور النباتات الأولى على اليابسة لم يكن عند أيٍّ منها أوراق. وعلى ما يبدو الآن، فإن ظهور النباتات المورقة لم يكن مؤكَّداً قطعياً قبل 360 مليون سنة.

ولا يزال سبب كل هذا التأخر في ظهور الأوراق لغزاً حقيقياً. وحتى بعد أول ظهور للأوراق، فقد استغرق الأمر عشرة ملايين سنة أخرى كي تنتشر على نطاق واسع وتتوزَّع بوفرة وتنوّع في جميع أرجاء الكوكب. فهذه المدة الطويلة جداً من الوقت بين ظهور نباتات اليابسة وبين ظهور نباتات اليابسة المورقة يمكن مقارنتها بظهور أسرع بكثير

للثدييات كبيرة الحجم والمتنوعة بعد انقراض الديناصورات منذ 65 مليون سنة، إذ لم يستغرق الأمر أكثر من عشرة ملايين سنة كي تظهر مجموعات الثدييات الرئيسة ليس فقط من حيث التنوّع وإنما أيضاً من حيث الوفرة وكبر الحجم.

ومجدداً ينبغي أن نلقي نظرةً على دور النَّماء التطوري لفهم هذا التاريخ التطوري الخاص. إذ تعيَّن على النباتات أن تطوّر أولاً مجموعةَ أدوات وراثية ضرورية لتجميع الأوراق، ولكن كان عليها أن تكون قادرة على استخدامها، ويبدو أن ذلك قد تأخر. وتشير أفضل الأدلة حتى الآن إلى أن النباتات ذات الأوراق كانت لديها الجينات الضرورية لبناء الأوراق، لكنها اضطرت بعد ذلك إلى انتظار حدوث تغيّرات في البيئة التي تعيش فيها. وفي هذه الحالة بالذات لم يكن الانتظار لحدوث ارتفاع تراكيز الأكسجين، كما كانت الحال بالنسبة إلى الحيوانات، وإنما شيئاً مختلفاً تماماً: وهو انتظار انخفاض تراكيز ثاني أكسيد الكربون الجوي، على الأقل وفقاً لأحدث تفسيرات علم النباتات القديمة في القرن الحادي والعشرين.

وهذا مثال آخر على أن أيامنا المعاصرة يمكن أن تخبرنا عن تاريخ الماضي، تاريخ حياتنا. فقد أظهرت التجارب التي أجريت على النباتات الحية أنها حساسة بشدة لتراكيز ثاني أكسيد الكربون التي تعيش فيها. وتحتاج جميع النباتات إلى ثاني أكسيد الكربون كي تقوم بعملية البناء الضوئي، ولتتمكن من ذلك يجب أن تمتص النباتات ثاني أكسيد الكربون من الجو المحيط بها. وفي حال وجود أوراق، فإنه ينبغي أن يدخل ثاني أكسيد الكربون بطريقة مختلفة عبر الجدار الخارج للورقة المانع، ويحدث ذلك عبر ثقوب بالغة الدقة تدعى المسامات Stomata. غير أن المسامات هي طريق ذو اتجاهين، فبينما يدخل ثاني أكسيد الكربون من خلال المسامات يستطيع الماء الموجود داخل النبات أن يخرج منها نفسها. والموضوع الذي يتكرر مراراً في قصة تطور حيوانات اليابسة ونباتاتها هو أن الجفاف يبقى العائقَ الأكبر للحياة. وفي البيئات التي يكون فيها تركيز ثاني أكسيد الكربون مرتفعاً يكون عدد المسامات قليلاً جداً، ويزداد عدد المسامات عندما تنخفض التراكيز.

وقد يعتقد المرء أن ارتفاع تراكيز ثاني أكسيد الكربون هو الشرط الأمثل لأيٍّ من نباتات اليابسة. وفي الواقع، هذا صحيح بالنسبة إلى هذه الآلية الفيسيولوجية. غير أننا نعلم أن ثاني أكسيد الكربون هو أحد غازات الدفيئة الرئيسة، وأن أوقات ارتفاع تراكيز ثاني أكسيد الكربون هي نفسها أوقات ارتفاع درجات الحرارة على سطح الأرض.

للنباتات نظام إشارة رائع يسمح للأوراق كاملة النمو والناضجة بالاتصال بالأوراق الآخذة بالنمو والنماء في مراحلها الأولى، وتُبلِّغ الأوراقُ الأكبر الأوراقَ الأصغر عن العدد الأمثل للمسامات التي يجب أن تنتجها تبعاً للشروط البيئية التي تعيش فيها. وإذا عدنا بالوقت إلى الوراء لمتابعة تراكيز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي، عندما بدأت نباتات اليابسة صعودَها التطوري أول مرة منذ أكثر من 400 مليون سنة؛ نلاحظ فترة زمنية تميزت بارتفاع ثاني أكسيد الكربون إلى تراكيز عالية جداً، ومن ثمَّ كان الكوكب حاراً إلى أبعد الحدود. في الواقع كان الجو حاراً لدرجةِ أن الحرارة بحدِّ ذاتها ربما كانت عاملاً أساسياً في كبح نجاح النباتات تطورياً وإيكولوجياً. والمسامات نفسها التي تسمح لثاني أكسيد الكربون بالدخول تُخرج الماء من داخل النبات؛ وهذه هي العملية التي من خلالها تبريد النبات بالفعل.

إن القليل من الجفاف يبرّد النبات لكنّ كثيراً منه يقتله، وكما هي الحال في كثير من الأشياء يكمن النجاح في التوازن. وفي المناخ شديد الحرارة يلزم كثير من التبريد، لكن عند ارتفاع ثاني أكسيد الكربون الجوي يحتاج النبات إلى عدد قليل جداً من المسامات للحصول على احتياجاته منه. وربما لا يكون عدد المسامات الضروري لإدخال ثاني أكسيد الكربون إلى جسم النبات أقل بكثير من الضروري لتبريده، خاصة إذا كانت المسامات تتموضع على سطوح كبيرة مسطحة كالأوراق. وفي هذه الحالة إذا كانت الورقة كبيرة مع عدد قليل من المسامات فإنها سوف تسبب فرط تسخين قد يؤدي إلى موت النبات. وهذا هو أحدث تفسير لطول المدة الزمنية التي استغرقها تطور الأوراق، إذ كان طقم الأدوات الجينية اللازمة لصنعها موجوداً، لكنّ النباتات لم تجسُر على القيام ببناء الأوراق بسبب كثرة ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي.

والعمل الجديد لديفيد بيرلينغ وغيره في أوائل القرن الحادي والعشرين يشير إلى أن الأمر تطلب حدوث انخفاضٍ في مستويات ثاني أكسيد الكربون قبل أن تصبح الأوراق قابلة للحياة أساساً، وقبل ذلك الوقت كانت أي ورقة بمثابة حكم بالموت على النبات. وهكذا حدث أن الأوراق والنظم المحسَّنة الناقلة للماء داخل النبات (بما في ذلك جذور جديدة تتوغل إلى أعماق أكبر) لم تظهر للمرة الأولى إلا بعد مضي أربعين مليون سنة من أول ظهورٍ للكوكسونيا *Cooksonia*. وهذه القدرة الأخيرة، أي القدرة على إرسال الجذور لأعماق أكبر من أي وقت مضى، أكسبت النباتات ميزتين اثنتين؛ الأولى: هي أن الجذور الأعمق تؤمن ثباتاً أكبر للنبات، والثانية: هي أن الجذور الأعمق تزيد إمكانية

الوصول إلى الماء والمغذيات في التربة. وكانت النباتات الأولى ذات نُظم تجذير سطحية، ولكن حالما تطورت الأوراق بدأت الجذور بالتغير والتطور لتتعمّق في التربة أكثر فأكثر. وبحلول العصر الديفوني نجد الأدلة على الجذور المتعمقة نحو الأسفل بأعماق تصل حتى ثلاث أقدام (نحو متر واحد). وقد زادت الجذور الجديدة الأكثر عمقاً من تجوية الصخور تحت هذه النباتات البدائية على نحو واسع. وكلّما عاش المزيد من النباتات في التربة، نفق منها أكثر وأكثر مضيفاً بذلك المواد العضوية للتربة. وفي الوقت نفسه زادت الجذور التي تغلغلت في التربة أكثر من أيّ وقت بشكل كبير من التجوية الآلية والكيميائية للصخور تحتها. وكانت لذلك عواقب مهمة بالنسبة إلى بنية الغلاف الجوي وحرارة الأرض.

لقد رأينا أن تجوية صخور السيليكات والجرانيت والصخور الرسوبية والمتحولة ذات التركيب الكيميائي الشبيه بالجرانيت، وهو نوع من الصخور الغنية بعنصر السليكون، لربما كانت الدافعَ الأكثر أهمية لإزالة ثاني أكسيد الكربون من الغلاف الجوي. وتتفاعل صخور السيليكات التي خضعت للتجوية الكيميائية على اليابسة، بحيث تؤدي إلى إزالة جزيئات ثاني أكسيد الكربون من الغلاف الجوي. ودُعي ذلك بالتعزيز الحيوي للتجوية Biotic enhancement of weathering، وحدث حالما بدأت الغابات الغنية بالشجر بتغطية اليابسة، أي منذ نحو 380-360 مليون سنة مضت. وعندما أخذت الجذور بالتغلغل نحو صخور السيليكات الواقعة تحتها بدأت الصخور المكونةُ للقارات (أي صخورُ الجرانيت والصخور التي تشبه بتركيبها الجرانيت) بالتجوية بسرعة أكبر بكثير مقارنة بالوقت الذي سبق وجودَ الغابات، وتسبب ذلك بالانهيار السريع لتراكيز ثاني أكسيد الكربون.

لقد سمحت تراكيزُ ثاني أكسيد الكربون الآخذة بالانخفاض للثلج بالظهور على القارات، وظهر في البداية على خطوط العرض الأكثر ارتفاعاً فقط، ولكن في نهاية المطاف بدأ يصل إلى خطوط العرض الأدنى. ولكنّ الضغط الهائل للتطور فضّل الأشجار الأكثر طولاً، ومعها جاءت الجذور الأكثر عمقاً. وهكذا صارت النباتات أطول والجذور أعمق والكوكب أبرد فأبرد. وتطور نباتات اليابسة مع جذورها الأكثر عمقاً أقحم الكوكب في واحد من أطول الأدوار الجليدية في تاريخ الأرض على الإطلاق، والذي بدأ في العصر الكربوني (الفحمي) Carboniferous period. وقبل حدوث ذلك بقي العالم دافئاً وخصباً وغنياً بثاني أكسيد الكربون بتراكيز صديقة للنباتات. وباختصار، كانت القارات حديثة الخُضرة ذات النباتات الوعائية تبدو كمتاجر بقالة عملاقة مكدَّسة لكنها خالية من الزبائن، وسيكون الطعام بالمجّان إذا استطعت دخول المتجر، وفي هذه الحالة نقصد الخروج من البحر إلى اليابسة.

حيوانات اليابسة الأولى

المشكلة الكبرى التي تواجه أيّ حيوان يحاول أن يستعمر الأرض هي فقدان الماء وتحتاج جميع الخلايا الحية إلى وجود سائل في داخلها، ولا تؤدي الحياة في الماء للتعرض لأيّ نوع من مشكلات الجفاف، أما الحياة على اليابسة فتتطلب وجود غلاف متين للاحتفاظ بالماء في الداخل. ولكنّ المشكلة تكمن في أن جميع الحلول التي تسمح بالتقليل من جفاف السطوح تعاكس متطلبات الغشاء التنفسي. ولذلك ها نحن بين أمرين أحلاهما مرّ: إما بناء غلافٍ خارجي يقاوم الجفاف، وهذا يعتبر من المزايا، ولكن في المقابل يزيد خطر الوفاة نتيجة الاختناق. أو البديل، وهو تطوير بنية تنفسية سطحية تسمح بانتشار الأكسجين إلى داخل الجسم، وتؤدي إلى زيادة خطر الجفاف عبر البنية ذاتها. ووجب على أي مستعمر لليابسة أن يتغلب على هذه المعضلة، وعلى ما يبدو كان ذلك في غاية الصعوبة، إذ إن عدداً قليلاً جداً من شعب الحيوانات والنباتات والطلائعيات تمكّن من إتمام الانتقال من الماء إلى اليابسة على مرّ التاريخ. وبالتأكيد لم يتمكن بعض من أكبر الشعب البحرية الحالية وأكثرها أهمية من تحقيق ذلك: فلا يوجد إسفنجٌ أرضيٌ ولا لاسعاتٌ ولا خيشوميات أرجل ولا بريوزوا ولا شوكياتُ جلدٍ على سبيل المثال لا الحصر.

ويبدو أن أقدم حيوانات اليابسة الأحفورية كانت جميعها من مفصليات الأرجل التي تشبه العناكب والعقارب والعثّ ومتساويات الأرجل Isopods في يومنا هذا وحشرات بدائية جداً. ولم يتضح أي واحدة من هذه المجموعات المختلفة جداً عن بعضها من مفصليات الأرجل كانت هي الأولى، لكن لم تبق المجموعة الأولى بمفردها طويلاً حيث عُثر على هذه المجموعات في السجل الأحفوري في الترسبات القديمة. وقد اعتمد تعيين هوية حيوانات اليابسة الأولى بالضرورة على السجل الأحفوري المعروف بعدم دقته فيما يتعلق بمفصليات الأرجل الأرضية الصغيرة. وتتصف هذه المجموعات بهياكل خارجية ضعيفة التكلس ومن ثمّ كان من النادر أن تبقى محفوظة كأحافير. وفي المدة الفاصلة بين السيلوري المتأخر والديفوني الباكر أو منذ نحو 400 مليون سنة أدى صعودُ نباتات اليابسة إلى اجتذاب طلائع الغزو الحيواني إلى الشواطئ، ومن الواضح أن سلالات متعددةً من مفصليات الأرجل قد طورت بشكل مستقل أجهزةً تنفسية قادرة على التعامل مع الهواء.

إن الأجهزة التنفسية التي نجدها عند العناكب والعقارب اليوم تقدم لنا مفتاحاً لفهم نجاحها في الانتقال من حيوانات بحرية إلى حيوانات برية ناجحة. وأهم واحدة من البنى المطلوبة لتحقيق هذه القفزة الحاسمة هي البنى التنفسية. ومن الواضح أن الرئات الباكرة التي استخدمتها مفصليات الأرجل الرائدة كانت عبارة عن بنى انتقالية كفاءتها بعيدة كل

البعد عن الأنواع اللاحقة. ولكن في جوٍّ غني بالأكسجين يمكن للهواء أن ينتشر عبر جدار الجسم عند حيوانات اليابسة الصغيرة جداً، ويبدو أن جميع حيوانات اليابسة الأولى كانت صغيرة الحجم، فضلاً عن أخذها للأكسجين بواسطة بناها الرئوية مهما كانت بدائية.

ومن الشعب التي نجحت في الانتقال إلى العيش على اليابسة توجد أشكال عديدة من مفصليات الأرجل إلى جانب الرخويات والحلقيات والحبليات (فضلاً عن بعض الحيوانات الصغيرة جداً كالديدان المُفلطحة). وقد تطورت مفصليات الأرجل مسبقاً إلى ما يضمن لها النجاح في ذلك؛ لأن هياكلها الخارجية التي تحيط بكامل جسمها كانت مناسبة لتؤمّن لها الحماية من الجفاف، إلا أنه كان لا تزال أمامها مهمة التغلب على مشكلة التنفس. وكما رأينا، فقد تطلّب الهيكل الخارجي لمفصليات الأرجل تطورَ خياشيم كبيرة واسعة على معظم قطع جسمها لضمان البقاء على قيد الحياة في العالم الكامبري قليل الأكسجين، إذ تصادف معظم الأصناف العليا من مفصليات الأرجل في السجل الأحفوري للمرة الأولى. فهذه الخياشيم الخارجية لا تعمل في الهواء، وكان الحل لدى أوائل مفصليات الأرجل والعناكب والعقارب الأرضية هو إنتاج نوع جديد من البنى التنفسية يدعى بالرئة الكتابية Book Lung، وسميت بهذا الاسم لتشابه الأجزاء الداخلية لهذه الرئات مع صفحات كتاب.

وتسمح مجموعة من الصفائح المسطحة داخل الجسم بجريان الدم بين صفحات الرئة. ويدخل الهواء إلى الرئات الكتابية من خلال سلسلة فتحات موجودة في الدرع Carapace، وهي رئات سلبية Passive lungs إذ لا يدخلها تيار من هواء بفعل «الشهيق»، بل تعتمد على توفر حد أدنى من تركيز الأكسجين.

ومن المعروف أن الرياح تحمل بعض العناكب الصغيرة على ارتفاعات عالية، لذلك لُقبت بـ«العوالق الهوائية»، وهذا - ظاهرياً - حجة لصالح أن نظام الرئة الكتابية عند العناكب قادر على استخلاص ما يكفي من الأكسجين في البيئات الفقيرة به. فهذه العناكب صغيرةٌ جداً دائماً لدرجةٍ يمكن معها تلبية جزء لا يستهان به من احتياجاتها التنفسية بالانتشار السلبي عبر الجسم. أما العناكب الأكبرُ حجماً؛ فتعتمد على الرئات الكتابية.

ربما تكون الخياشيم الكتابية أكثر فعالية في الحصول على الأكسجين مقارنة بالجهاز التنفسي للحشرات الذي يتألف من قصبات هوائية Trachea أنبوبية الشكل. والجهاز التنفسي في الحشرات سلبي، مثلما هو الأمر عند العناكب والعقارب، إذ يوجد قليل- أو يكاد لا يوجد - فيه أيُّ ضخٍّ للهواء، مع أن الدراسات الحديثة على الحشرات أظهرت أنه ربما تحدث فعلاً عمليةُ ضخٍّ خفيفة بضغوط منخفضة جداً. وتتصف الرئة الكتابية لدى

العنكبيات بمساحة سطح أكبر مقارنة بالحشرات، ومن ثمَّ ينبغي أن تعمل بوجود تراكيز أقل من الأكسجين الجوي.

ومعرفة الوقت الذي حصل فيه هذا الاستعمار الأول لليابسة يعوقها صغر حجم العناكب والعقارب الباكرة وطبيعتها التي لا تؤهلها للتحجر والحفظ في السجل الأحفوري، والعقارب في يومنا هذا أكثر تمعدناً منْ العناكب، فلا عجب في أن سجلّها الأحفوري أفضل. وقد اكتشفت أقدم الأدلة على قِطع الحيوانات في صخور السيلوري المتأخر في ويلز، ويبلغ عمرها 420 مليون سنة تقريباً، قرب نهاية العصر السيلوري - وهو الوقت الذي وصل فيه الأكسجين إلى تراكيز عالية جداً كانت الأعلى من أي وقت سابق على الأرض. فهذه الأحافير الباكرة نادرةٌ وقليلة التنوع لكن حُدِّدت هويتها: إذ يبدو أن معظم المواد أتت من أحافير كثيرات الأرجل Millipedes.

وقد عُرف تجمُّع أكثرُ غنى بكثير مؤرَّخ بنحو 410 ملايين سنة من العمر من الطَفَل رايني الصواني Rhynie Chert الشهير في أسكتلندا. وقدمت هذه الترسباتُ أحافيرَ النباتات الباكرة جدا إلى جانب أحافير مفصليات الأرجل الصغيرة. ويبدو أن معظم مفصليات الأرجل هذه من أقارب العث Mites و القافزات بالذنب (الكهدليات) Springtails المعاصرة، وكلتاهما تتغذى ببقايا النباتات والفضلات. وهكذا، فقد تكيفت جيداً مع العيش في مجتمعات اليابسة الحديثة التي تكونت بشكل أساسي من النباتات البدائية الصغيرة. إن العث من أقارب العناكب، أما قافزات بالذنب فهي حشرات، ويُحتمل أنها الأكثر قدماً في هذه المجموعة الحيوانية الأكبر بين كل المجموعات التي تعيش على الأرض حاليا. وقد يكون من المتوقع أنه حالما تطورت الحشرات تنوعت لتكون مجموعةَ الحيوانات الأرضية الأكثر وفرة وتنوعاً في وقتنا الحالي. إلا أن الحال لم تكن كذلك، ويبدو أن الحقيقة في الواقع معاكسة تماماً.

ووفقاً لعلماء الحشرات القديمة بقيت الحشراتُ أعضاء نادرة وهامشية في حيوانات اليابسة حتى نهاية العصر الميسيسيبي Mississippian period تقريباً، منذ نحو 330 مليون سنة، عندما وصلت تراكيز الأكسجين إلى مستويات تماثل تراكيزها الحالية، وفي الواقع كانت في طريقها صعوداً لتسجل تراكيز قياسية بلغت ذروتها في العصر البنسيلفاني المتأخر Late Pennsylvanian period، منذ نحو 310 ملايين سنة. وقد تطورت القدرة على الطيران عند الحشرات بعد وقت طويل من الظهور الأول لهذه المجموعة، إذ لا تظهر أحافير الحشرات التي لا شكّ في قدرتها على الطيران في السجل الأحفوري بكميات وفيرة إلا قبل نحو 330

مليون سنة. وسريعا بعد هذا التطور الأول، فقد باشرت الحشرات صعودها التطوري الرائع نحو أنواع جديدة، ولا سيما الأشكال الطائرة. وكان ذلك تطورا إشعاعيا تكيفيا Adaptive radiation كلاسيكياً، أي عندما تسمح الاختراقات التطورية المورفولوجية باستعمار بيئات (جيوب) إيكولوجية جديدة. ولكن ذلك التشعُّب حدث أيضاً عند ذروة الأكسجين، ودعمته وساعدته إلى حدٍّ كبير تراكيز الأكسجين الجوي المرتفعة.

ولم تكن الحشراتُ أيضاً أولَ الحيوانات على اليابسة، إنما يمكن أن يُمنحَ هذا الوسام للعقارب. وفي وقت السيلوري الأوسط، أي منذ نحو 430 مليون سنة، زحفت سلالةٌ من العقارب البدائية ذات الخياشيم المائية خارجةً من مستنقعات الماء العذب والبحيرات التي كانت قد تكيفت للعيش فيها وانتقلت إلى اليابسة ثم انتشرت في أرجائها، وربما كانت تأكل جيف الحيوانات كالأسماك الميتة التي تنجرف إلى الشاطئ. وبقيت أماكن الخياشيم رطبة، وربما سمحت مساحةُ سطح الخياشيم الواسعةُ هذه بنوع من أنواع التنفس. وبالتأكيد لم تكن لتلك العقارب رئات وظيفية، بل خياشيم لها بعض الفوائد فحسب.

وها هو الجدول الزمني كما نعرفه اليوم: وُجدت العقارب على اليابسة منذ نحو 430 مليون سنة، لكن ربما كانت أشكالها لا تزال مقيَّدة بالماء للتكاثر، وربما حتى للتنفس؛ وتبعتها كثيرات الأرجل منذ 420 مليون سنة، والحشرات منذ 410 ملايين سنة. ولكن الحشرات الشائعة لم تظهر حتى 330 مليون سنة مضت. فكيف يرتبط هذا التاريخ بمنحنى تراكيز الأكسجين الجوي؟

تشير أحدث التقديرات لتراكيز الأكسجين الجوي في ذلك الوقت إلى حدوث ذروة في ارتفاع تركيز الأكسجين منذ نحو 410 ملايين سنة، متبوعة بانخفاض سريع، ثم ارتفعت مجدداً بدءاً من تراكيز جدُّ منخفضة 12 في المئة في نهاية الديفوني إلى التراكيز الأعلى في تاريخ الأرض؛ فتجاوزت ثلاثين في المئة في فترة زمنية ما من البرمي (مقارنة بـ 21 في المئة اليوم). وطَفَل رايني الصواني -الذي أسفر عن أول حيوانات وافر من الحشرات والعنكبيات- يعود تماماً إلى فترة أعلى نسبة أكسجين في الديفوني. وبعد ذلك تندر الحشرات في السجل الأحفوري (بحسب علماء الأحافير الذين يدرسون تنوع الحشرات) إلى أن يرتفع الأكسجين مجدداً إلى عشرين في المئة في العصرين الميسيسيبي والبنسيلفاني، أي الفترة الزمنية قبل ما بين 330-310 ملايين سنة مضت، وهو الوقت الذي حدث فيه تنوُّع Diversification الحشرات المُجنّحة.

وقد مكّن ارتفاعُ تراكيز الأكسجين الجوي خلال الفترة الزمنية الأوردفيشية- السيلورية، على ما يبدو، استعمارَ اليابسة من قبل مجموعات مختلفة من الفقاريات. فلو لم يحصل ذلك

الاستعمار؛ فلربما اختلف تاريخ وأشكال الحيوانات التي استعمرت اليابسة، أو لما حدث ذلك قط؛ أي ربما لم تستعمر الحيوانات اليابسةَ قطُّ. ونحن نعلم أيضاً أنه عقب ذلك الاستعمار أصبحت الحيوانات نادرة على ما يبدو، خلال الوقت اللاحق من انخفاض الأكسجين.

هناك ثلاثة احتمالات لهذا الطراز الملاحَظ من وفرة الأحافير وتنوعها. الاحتمال الأول هو أن «التوقف» الظاهري في استعمار اليابسة غيرُ حقيقيٍّ على الإطلاق؛ وإنما هو تشوه للصورة بسبب سوء جودة السجل الأحفوري خلال الفترة الزمنية الممتدة قبل ما بين 400 و370 مليون سنة. والاحتمال الثاني هو أن "التوقف" حقيقي؛ فبسبب الانخفاض الكبير في تراكيز الأكسجين بقي عددٌ قليل جداً من مفصليات الأرجل، ولا سيما الحشرات، على اليابسة. لكن القِلَّة الناجية استطاعت التنوع إلى موجة من الأشكال الجديدة عندما ارتفعت تراكيز الأكسجين مرة ثانية بعد ما يقارب ثلاثين مليون سنة. والاحتمال الثالث هو أنه انقرضت الموجات الأولى من الغزاة القادمين من البحر للمشاركة في غزو اليابسة نتيجة انخفاض الأكسجين. نعم، صمد عدد قليل من الناجين هنا وهناك، غير أن الموجة الثانية كانت عبارة عن جحافل جديدة من الغزاة الذين هجموا مجدداً على اليابسة تحت ستارة من الأكسجين. وهكذا، فقد استُعمِرت اليابسة من قبل الحيوانات (مفصليات الأرجل والفقاريات كما سنرى) من خلال موجتين مختلفتين: إحداهما منذ 430-410 ملايين سنة مضت، والثانية منذ 370 مليون سنة فصاعداً.

وبالطبع لم تكن مفصليات الأرجل وحدها التي استعمرت اليابسة وصنعت حياة جديدة، بل أيضاً بطنيات الأرجل من الرخويات التي قامت بقفزة تطورية جديدة على اليابسة، لكنّ هذا الانتقال لم يحدث حتى البنسيلفاني (ومن ثمّ كانت جزءاً من الموجة الثانية) عندما كانت تراكيز الأكسجين أعلى من أي وقت خلال الموجة الأولى. وتوجد مجموعة أخرى اندفعت نحو الشاطئ هي سرطانات حدوة الحصان Horseshoe Crab، تقريباً في وقت خروج الرخويات نفسه، لكنّ هاتين المجموعتين هما من المستعمِرين الثانوية مقارنةً بالمجموعة ذات الشأن الأعظم في تاريخ الحياة هذا، وهي مجموعة الفقاريات مجموعتنا. ولم تبرز البرمائيات من البحر على نحو مفاجئ، بل كانت تتويجاً لتاريخ تطوريٍّ طويلٍ. وقبل ظهورها على اليابسة في حكايتنا دعونا نلقِ نظرة على مرحلة من الوقت دُعيت بزمن الأسماك Age of Fish من العصر الديفوني، ولذلك نودّ أن نستعرض واحداً من مجالاتنا المفضلة وهو حوض كانينغ Canning Basin في أستراليا الغربية من الديفوني، حيث قضى كلا المؤلفين المشاركين عدة مواسم ميدانية في واحد من أكثر الأماكن جمالاً على هذا الكوكب (على الرغم من حرارتها!).

ويحافظ حوض كانينغ على أفضل نظام للشعاب المرجانية المتأحفرة. كما لو أن الحيد المرجاني العظيم قد تحول فجأة إلى صخر وزالت المياه. وبينما كان معظم العمل الذي أنجز حتى الآن هو في دراسة الشعاب الديفونية العملاقة، فقد أسفرت الترسبات الصخرية في المياه العميقة المجاورة خلال العصر الديفوني عن بعضٍ من أكثر الدراسات الأحفورية استثنائية، في الواقع، والتي تحتاج إلى العرض بالتأكيد ضمن أي تاريخ يسمّي نفسه بالتاريخ «الجديد» للحياة.

جون لونغ وأسماك تكوين غوغو

تنتشر الأسماك في المياه المالحة والعذبة وجميع درجات الملوحة بينهما، لكنه من النادر جداً أن تتأحفر الأسماك. ولكي تُحفظ السمكة بكاملها تلزم عادةً بيئة قاعٍ بحري فقير بالأكسجين تُدفن السمكة الميتة فيه بسرعة. فالحيوانات القمّامة (آكلات الجيف) Scavengers ماهرة جداً في تمزيق جثث الأسماك إرباً، لكن قد تبقى بعض الأسماك محفوظة على شكل أحافير جميلة هنا وهناك. وفي بعض الأحيان تظهر بشكل ثنائي الأبعاد كالتي وُجدت في طَفَل النهر الأخضر Green River Shale في كولورادو وتعود إلى فترة الإيوسين، وهو الموقع الذي عُثر فيه على أكبر عدد من أحافير الأسماك من أي موقع آخر. ويمكن أن تُحفظ الأجزاء الأخرى من الأسماك كجماجم الأسماك الكبيرة في كرات مستديرة كبيرة من الصخور تسمى المتحجِّرات Concretions. وكثيراً ما نجد في الصخور الرسوبية هذه العناصر الشبيهة بكرات المدفع وقد تحتوي على أكثر الأحافير المحفوظة جمالاً. وتصادف هذه المحفوظات في الطبقات التي تعود إلى العصر الديفوني في شمال أوهايو، حيث تكتشف جماجم أسماك عملاقة منذ قرن، بما في ذلك جمجمة أحد الوحوش الأيقونية، وهو سمكة قديمة تدعى دنكليوسيتاس Dunkleosteas وظهرت في الآونة الأخيرة في البرامج الشعبية لقناة ديسكفري Discovery Channel عن الحيوانات المفترسة القديمة. كما وُجدت في أحد التكوينات الصخرية التي أُطلق عليها اسم غريب وهو تكوين غوغو Gogo Formation بنفس عمر صخور دراستنا من العصر الديفوني (لكن من مواقع مائية أكثر عمقاً). وعُثر بين هذه المتحجِّرات الشبيهة بكرات المدفع على بعضٍ من أهم الأحافير المكتشَفة على الإطلاق، والتي منحتنا المعرفة عن المنصة التي ظهر منها في نهاية المطاف أسلاف البرمائيات. ولفهم استعمار اليابسة علينا أن نتعرف أولاً على عالَم الأسماك الديفوني بكامل تنوعه وتعقيده. ففي السنوات الأخيرة استخدم عالم الأحافير الأسترالي جون لونغ John Long، وهو أستاذ من جامعة فليندرز أديلايد بأستراليا (له أيضاً مسيرة مهنية طويلة في متحف مقاطعة لوس أنجلس للتاريخ الطبيعي)، تقنيةَ المسح عالي

الدقة للقيام باكتشافات خارقة عن أسلاف جميع الأسماك المعاصرة إلى جانب السلالات التي عاشت في الماضي السحيق، والتي نحمل جيناتها في حمضنا النووي DNA.

إن لونغ من الأكاديميين الأستراليين النادرين إذ له سيرة مهنية ناجحة ومثمرة في التثقيف العلمي، فقد ألّف عدداً من الكتب العلمية التثقيفية. إلا أن عمل لونغ «النهاري»، أي العمل البحثي الأساسي، أثبت أن تطور وشكل وتنوع وبيئة أسماك العصر الديفوني كانت أكثر تعقيداً مما تصوره الكتب الدراسية اليوم. ومن خلال استخدامه الرائد لتقنيات التصوير مثل التصوير المقطعي المحوسب CT scanning الذي يمطر الأحافير بوابل من الطاقة الكافية لإنتاج شرائح ثلاثية الأبعاد لهذه الأحافير، تمكّن لونغ حرفياً من النظر داخل رؤوس مجموعات الأسماك المختلفة.

إن مجموعات الأسماك «التقليدية» الأربع التي تتمثل اليوم بالجلكي *Lampreys* والجريث Hagfish؛ وسمك القرش؛ والأسماك «العظمية»، وهي المجموعة الأكثر تنوعاً؛ ومجموعة انقرضت كليا هي لوحيات الأدمة (بلاكوديرم) Placoderms (أول الأسماك الفكية) أكثرُ تعقيدا بكثير ومن النواحي مما كانت تُصوَّر عليه منذ وقت طويل. وتضمّنت اكتشافاتُ لونغ الكبرى من رحلاته الميدانية إلى مواقع غوغو الأحفورية أولَ جمجمة كاملة تعود لواحدة من أوائل الأسماك العظمية ودُعيت غوغونوسوس *Gogonasus*، والتي أظهرت أن هذا النوع له فتحات تنفسية Spiracles كبيرة، أو ثقوب، لم تصادفَ في السابق في قمة الرأس عند الأسماك. ولكن الاكتشاف الأكثر إثارة للدهشة (إضافة إلى إثباتِ وجودِ تنوع لم تُعرف قبل ذلك في مختلف أشكال الأسماك الباكرة، بما في ذلك أنماط جديدة من الأسماك الرئوية، وهي ذات قرابة للأسماك التي زحفت في النهاية إلى اليابسة، إلى جانب أسماك غريبة دُعيت مفصليات الرقبة (Arthrodires) كان اكتشافه للأسماك الديفونية الأولى مع أجنّة بداخلها. وهذا الاكتشاف هو أول مرة يوثّق فيها حدوث التكاثر بالإخصاب الداخلي لأول، إضافة إلى كونه أقدم مثال معروف حتى الآن على ولودية Viviparity الفقاريات. وكانت إحدى هذه العينات هي الأحفورة الوحيدة المعروفة التي تُظهر وجود بنية متمعدنة متعلقة بالحبل السري متصلة بالجنين الذي لم يولد. وقد استخدم لونغ طرقه ذات التقنية العالية للحفاظ بشكل رائع على البنية ثلاثية الأبعاد للأنسجة العضلية والخلايا العصبية والشعريات الدقيقة وكلها تفاصيل جديدة من الأسماك الأحفورية. واكتشافاته الأكثر أهمية لفهم الانتقال إلى اليابسة هو اكتشاف الأنسجة الرخوة التي قدمت رؤية جديدة تماماً حول كيف تمكّنت الأسماك من تطوير أجداد قادرة على المشي، بل حتى المشي بانتصاب على رجلين.

تطور الفقاريات البرية

إن انتقال مجموعتنا نحن من كائنات مائية بحتة إلى كائنات برية حقيقية بدأ بتطور البرمائيات الأولى. وقد زوّدنا السجلّ الأحفوري بدرجة مقبولة من فهم الأنواع المعنية بهذا الانتقال والوقت الذي حدث فيه. وعلى ما يبدو، فإن مجموعة من الأسماك العظمية التي تعود إلى العصر الديفوني تُعرف بالريبيديستيات *Rhipidistians* هي أجداد البرمائيات الأولى. وكانت من الأسماك المفترسة المهيمنة، ويبدو أن معظمها أو جميعها كانت تعيش في الماء العذب. وهذا بحد ذاته أمرٌ مثير للاهتمام، ويدل على أن الجسر إلى اليابسة كان عبر الماء العذب أولاً، وقد ينطبق هذا على مفصليات الأرجل أيضاً.

وعلى ما يبدو كانت الريبيديستيات متكيفة مسبقاً لتطوير الأطراف التي تتيح لها التنقل على اليابسة بفضل وجود فصوص لحمية على زعانفها. أمّا أسماك السيلوكانث التي لا تزال حية إلى يومنا؛ فتقدم إلينا مثالاً شهيراً على الأحافير الحية ونموذجاً لتخيّل هذا النوع من الحيوانات الذي نشأت منه البرمائيات. ولكنّ مجموعة أخرى من لحميات الزعانف، وهي الأسماك الرئوية Lung fish، مفيدة أيضاً في فهم الانتقال، لا من حيث التنقل، بل في فهم الانتقال من الخياشيم إلى الرئة. ولا تفيد أفضل الأطراف في العالم إذا كان برمائي المُنتَظر غير قادر على التنفس. وهكذا، كانت هناك سلالتان من لحميات الزعانف (الأسماك ذات الزعانف الفصية) هما: لحميات الزعانف (ومنها أسماك السيلوكانث)، والأسماك الرئوية.

ويؤرّخ انشقاق سلالات البرمائيات عن أجدادها شعاعيات الزعانف (في هذه الحالة فصيات الزعانف) بنحو 450 مليون سنة مضت، أو تقريباً عند الانتقال من العصر الأوردفيشي إلى السيلوري. ولربما كان ذلك مجردَ تطور لسلالات الأسماك التي تطورت البرمائيات منها في نهاية المطاف، وليس نتيجة تطور البرمائيات بحد ذاتها. ويَعتبر عالم الأحافير روبرت كارول Robert Carroll، وهو المتخصص بهذه المرحلة الانتقالية، أن جنس الأسماك المعروفة بعظمية الحراشف *Osteolepis* هو المرشح الأفضل ليكون أحدث جدّ من الأسماك للبرمائيات الأولى، ولم يظهر هذا الجنس حتى الديفوني الباكر إلى المتوسط أي منذ نحو 400 مليون سنة.

وربما تطورت البرمائيات الأولى التي عاشت على اليابسة في هذا الوقت، وذلك بناء على أدلة مُحيِّرة لآثار أقدام مكتشفة في أيرلندا. وفُسِّرت مجموعة من آثار الأقدام التي عُثِر عليها في فالينشيا Valentia بأنها أقدم سجل للحيوانات ذات الأطراف التي تركت آثاراً لأقدامها، وأُرِّخ عمرها بنحو 400 مليون سنة. ولم يُعثر على هياكل مرافقة لهذا الدرب الذي يتألف من 150 أثراً لأقدام حيوان مفرد يمشي في الطين القديم ويجر ذيلاً سميكا. فقد فجر هذا

الاكتشاف جدلاً؛ لأنه يسبق عظام أوائل رباعيات الأرجل Teterapod المؤكدة بنحو مليون سنة. ومع ذلك، فإنه من المثير للاهتمام أن تاريخ هذا الدرب يعود إلى الفترة الزمنية التي وصلت فيها تراكيز الأكسجين إلى مستوياتها الحالية أو تجاوزتها، وفي الوقت نفسه أسفر السجل الأحفوري للحشرات، الذي سردناه سابقا، عن أول نماذج الحشرات والعنكبيات الأرضية. وهكذا، فمثلما ساعد الأكسجين المرتفع على انتقال الحشرات من الماء إلى اليابسة فربما سمح أيضاً بتطور أول حيوان فقاري يعيش على اليابسة.

إن اللايقين الذي يحيط بعمر آثار أقدام أول الفقاريات على اليابسة قد خفّ قليلاً بعد أن اكتشفت في عام 2010 مجموعة ثانية من آثار أقدام، تُبيّن أن عمرها 395 مليون سنة، وكانت محفوظة في الرواسب البحرية في الساحل الجنوبي لبولندا الحالية، وهي من العصر الديفوني المتوسط. وبعض هذه المسارات يُظهر وجود أصابع، وهكذا فإنها تفوق عمر أحافير أقدم كائن معروف رباعي الأرجل بنحو 18 مليون سنة. فضلاً عن كون هذه المسارات قد أظهرت أن الحيوان كان قادراً على القيام بأحد أنماط الحركة باستخدام طرفيه الأماميين وطرفيه الخلفين، وهذا ما لم تقدر عليه رباعيات الأرجل الأكثر شبهاً بالأسماك ورباعيات الأرجل القريبة منها، مثل التيكتاليك الذي سبق ذِكره وحفيده المحتمل الأكانتوستيغا *Acanthostega*.

والحيوان الذي خلّف هذه الآثار كان كبير الحجم بالنسبة إلى حيوانات زمنه، إذ تخمّن بعض التقديرات طوله بأكثر من ثماني أقدام (أي نحو مترين ونصف). ولربما كان هذا المخلوق وأمثاله عبارة عن آكلات جيف تعيش على المسطحات المدّيّة، وتتغذى بالحيوانات البحرية النافقة التي ساقها المد إلى الشاطئ، أو على مفصليات الأرجل البرية العديدة بما فيها العقارب والعناكب.

لم تكن أحافير عظام رباعيات الأرجل الأولى معروفة قبل الصخور التي يبلغ عمرها 360 مليون سنة، ومن ثمّ فإن الانتقال قد حدث في الفترة الزمنية بين 400 -360 سنة مضت. وما يميز هذا المجال هو الانخفاض السريع للأكسجين، وتأتي أحافير رباعيات الأرجل الأولى من وقت تُظهِر فيه انخفاضا في تراكيز الأكسجين إلى أدنى مستوى على منحنى بيرنر. إلا أنه يرجح أن الانتقال الحقيقي من أسماك إلى برمائيات لابدّ من أن يكون قد حدث في وقت أبكر بكثير، أقرب إلى ذروة ارتفاع تركيز الأكسجين الديفونية، حتى وإن كان ذلك في مرحلة انخفاض الأكسجين.

ويأتي معظم فهمنا لهذه الأحداث المفصلية من بضعة مواقع محلية فقط، والبروزات في غرينلاند هي الأكثر غنى ببقايا رباعيات الأرجل. وعلى الرغم من أن معظم النصوص تسبغ على

جنس الإكثيوستيغا شرف كونه الأقدم، إلا أن جنساً مختلفاً دُعي فينتاستيغا *Ventastega* هو الأقدم في الحقيقة، مؤرّخا عند نحو 363 مليون سنة، تبعه بعد عدةِ ملايين من السنين تشعُّبٌ معتدل تضمّن الإكثيوستيغا والأكانتوستيغا *Acanthostega* وهاينربيتون *Hynerpeton*.

وكان الإكثيوستيغا أشهرها قبل اكتشاف التيكتاليك. والآن، يمكننا القول إنّ الشهرة الحديثة للتيكتاليك في غير محلها إلى حدٍّ ما. فالتيكتاليك عبارة عن سمكة، أما الإكثيوستيغا فكان شيئاً آخر. إنه من البرمائيات، فقد انتُشِلت عظامه لأول مرة في ثلاثينات القرن الماضي وكانت عبارة عن قطع، ولم يعد تشكيل الهيكل بكامله إلا في الخمسينات بعد إجراء فحوص دقيقة. وكانت لهذا الحيوان أرجل جيدة النمو، لكن كان له أيضاً ذيل يشبه ذيل السمكة. وأظهرت دراسات لاحقة أن هذا الحيوان الذي عاش منذ 363 مليون سنة كان على الأرجح عاجزاً عن السير على اليابسة. ويبدو أن دراسات أحدث حول قَدم الحيوان وكاحله تشير إلى أنه لم يكن قادرا على حمل جسمه دون مساعدة الطفو عندما يُغمر جسمه في الماء.

لقد أتت الطبقات Strata التي احتضنت الإكثيوستيغا وغيرها من رباعيات الأرجل البدائية في غرينلاند من المجال الزمني بُعيدَ الانقراض الجماعي المدمر في الديفوني المتأخر، والذي كان سببه بالتأكيد هو انخفاض الأكسجين الجوي الذي ولّد نقص أكسجة واسعاً في البحار. وربما كان ظهور الإكثيوستيغا وإخوته مُحرَّضاً بهذا الانقراض، إذ يَتبعُ الانقراضَ الجماعيَّ غالباً استحداثٌ تطوريٌّ كاستجابة لملء الجيوب الإيكولوجية الفارغة. ونجاح الإكثيوستيغا وأشقائه لم يدم طويلاً: إذ يُظهر السجل الأحفوري اختفاءها خلال بضعة ملايين من السنين التي تلت ظهورها الأول إلى جانب غيرها من رباعيات الأرجل الرائدة.

إن ظهور الإكثيوستيغا وأشقائها في الديفوني المتأخر يطرح أسئلة جوهرية. فإذا كانت هذه الكائنات فعلاً هي الفقاريات الأرضية الأولى، فلِمَ لم يتبعها تشعب تكيفي لأحفادها؟ ولكنْ هذا لم يحصل، بل حصل انقطاع طويل قبل ظهور المزيد من البرمائيات. فقد أربك هذا الانقطاع أجيالاً من علماء الأحافير. وعُرف في الواقع بانقطاع رومر Romer's gap نسبة إلى عالم الأحافير ألفريد رومر Alfred Romer في أوائل القرن العشرين، الذي كان أول من لفت الانتباه إلى الانقطاع الغامض بين الموجتين الأولى والثانية لغزو اليابسة من قبل الفقاريات. وفي الواقع، فإن التشعُّب التطوري المتوقَّع للبرمائيات لم يحدث حتى 340 -330 مليون سنة مضت؛ مما يجعل طول مدة انقطاع رومر ثلاثين مليون سنة على الأقل.

وبشكل مماثل، فقد وضع جون لونغ ومالكوم غوردون Malcolm Gordon ملخصاً في عام 2004 مفاده أن رباعيات الأرجل التي عاشت في الفترة الزمنية بين 370 -355 مليون

سنة، أي في وقت انخفاض الأكسجين الكبير، كانت مائية بحتة، خاصة الأسماك ذات الأرجل مع أن بعضها فقد خياشيمه. وكان التنفس بابتلاع الهواء مثل العديد من الأسماك الحالية وامتصاص الأكسجين عبر الجلد. ولم تكن رباعيات الأرجل برمائيات كالتي نعرفها حاليا، أي الأنواع التي يستطيع البالغ منها أن يعيش كامل حياته على اليابسة. ويبدو أن رباعيات الأرجل الديفونية لم يكن لديها أي من أشكال مرحلة الشرغوف Tadpole stage.

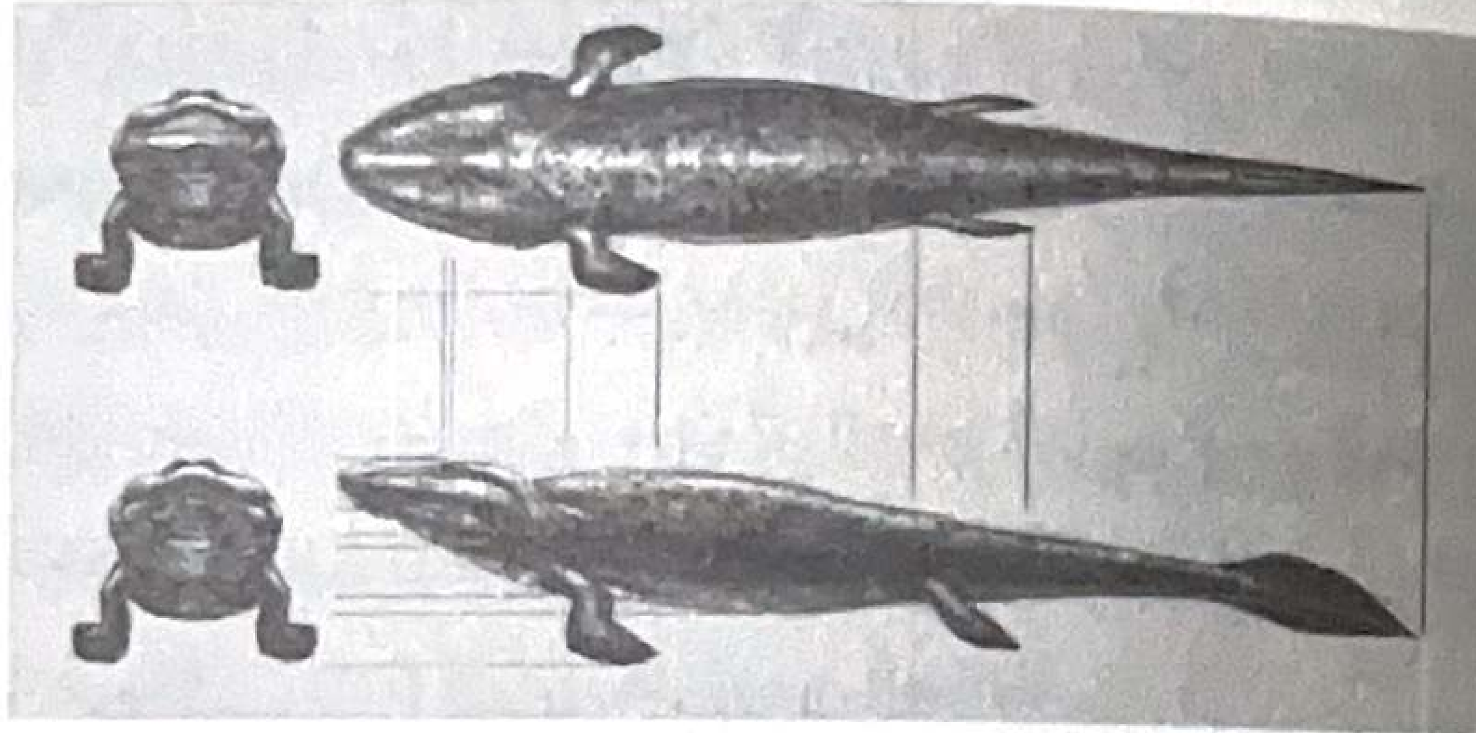
و«سُدّت» هذه الثغرة المديدة المفترَض خلوّها من البرمائيات من قبل جيني كلاك Jenny Clack في عام 2003. فقد صادفت في أثناء تفحصها العميق لمجموعات قديمة في المتحف أحفورةً سَبق تفسيرها خطأً بكونها سمكة مائية بحتة، لكنّ جيني بيّنت أنها كانت رباعية أرجل لها خمس أصابع وبنيةُ هيكلها من شأنها أن تسمح بالحياة على اليابسة. وأعطيت هذه الأُحفورة اسماً جديداً هو بيدربيس *Pederpes*، وقد عاشت بعد التيكتاليك بوقت طويل. وبالفعل قد يكون بيدربيس البرمائي الحقيقي الأول، وأتى فعلاً من الفترة الزمنية الممتدة بين 354-344 مليون سنة مضت والمعروفة بانقطاع رومر. ولكنْ، كما هي الحال في كثير من الأمور المتعلقة بالماضي، فإن الأحافير تطرح أحياناً أسئلة أكثر مما تقدّم أجوبة، فهي تخبرنا حقاً أنه في وقتٍ ما في منتصف انقطاع رومر قام أحد رباعيات الأرجل بتطوير الأطراف اللازمة للحياة على اليابسة. ولم يُعرف حتى الآن ما إذا كان قادراً على تنفس الهواء أو حتى الظهور فوق سطح الماء حتى ولو لدقائق قليلة.

اعتقد ألفريد رومر أن تطور البرمائيات الأولى حدث بتأثير الأكسجين. واعتبر رومر أن الأسماك الرئوية ومكافئاتها الديفونية كانت محتجَزة في أحواض صغيرة يمكن أن تجف موسمياً، وأن نقص الأكسجين الناجم عن العمليات الطبيعية في هذه الأحواض، إلى جانب الجفاف، كان الدافع التطوري للرئة - أي إن البرمائيات المستقبلية كانت مجبرة على الخروج من الأحواض إلى الهواء. والحيوانات القادرة على العيش في أوقات الخروج من المياه صارت عندها ميزة تدريجياً، فهذه الأسماك لا تزال لها خياشيم، لكن الخياشيم نفسها سمحت بامتصاص القليل من الأكسجين. وهكذا لربما كان عند الأشكال الانتقالية كل من الخياشيم والرئات البدائية.

إن الانتقال من رباعيات الأرجل المائية مثل الإكثيوستيغا أو البيدربيس (وقد يكون البيدربيس هو الأكثر احتمالاً) قد مرّ بمرحلة التيكتاليك في مخطط جسم الأسماك، وخضع لتغيّرات في المعصمين والكاحلين والعمود الفقري وأجزاء أخرى من الهيكل المحوري من شأنها أن تسهِّل التنفس والتنقل. فالأقفاص الضلعية مهمة لإيواء الرئتين، وقد دعت حاجة دعم الجسم الكبير في الهواء، مقارنة بطفو الجسم نفسه في الماء، إلى حدوث تغيّرات شاملة

للحزام الكتفي ومنطقة الحوض والأنسجة الرخوة التي تربطها معاً. ويمكن اعتبار الأشكال الأولى للحيوانات التي أنجزت هذه التغيّرات كلها أولَ البرمائيات البرية. ومع ذلك، فإن حدوث تشعّب عظيم لأنواع جديدة من البرمائيات، والذي كان متوقَّعاً أن يحصل بُعيد تطور الجهاز التنفسي القادر على تنفس الهواء وليس الماء، وتطور الأطراف التي تمكّن جسم الحيوان الثقيل من التحرك على اليابسة، لم يحصل حتى 340-330 مليون سنة مضت. غير أنه عندما انطلقت أخيراً كان انطلاقها مذهلاً، وبحلول نهاية العصر الميسيسيبي (أي منذ 318 مليون سنة تقريباً)، كان هناك العديد من البرمائيات في مواقع من مختلف أنحاء العالم.

وتشير الأدلة الموجودة بين يدينا إلى أن تطور مستوى تنظيم البرمائيات، أي الأسماك التي صعدت إلى اليابسة، حدث ربما مرتين أو حتى ثلاث مرات، أولاها منذ نحو 400 مليون سنة بناء على آثار الأقدام في فالينشيا إضافة إلى اكتشاف أُحفورة التيكتاليك، والثانية منذ نحو 360 مليون سنة، أما الأخيرة فحدثت منذ 350 مليون سنة تقريباً. وربما كانت الإكثيوستيغا، التي اعتُقد طويلاً أنها تشير إلى ظهور الفقاريات الأولى على اليابسة، أكثر شبهاً بالأسماك مما اعتُقد سابقاً، وفقدانها للخياشيم لا يُعتبر دليلا على أن موئلها أرضي بالكامل. وفي الواقع، نعلم الآن أنه يوجد أكثر من مئة نوع مختلف من الأسماك المعاصرة تتنفس بالهواء بطريقة ما (إلى جانب الخياشيم). وقد تطور التنفس الهوائي بشكل مستقلّ لدى ما لا يقلّ عن 68 نوعاً من هذه الأسماك الموجودة؛ مما يدلّ على سهولة حدوث هذا التكيّف. وربما لا تكون الإكثيوستيغا على الخط المؤدي لباقي سلالات رباعيات الأرجل، بل الخط التطوري لسلالة تتطور مجددا للتوجه نحو الحياة المائية بشكل كامل، حيث أُجبرت على ترك اليابسة لكون رئتها بدائية وبسبب انخفاض تراكيز الأكسجين في الديفوني المتأخر.



تصور فنان رسمَ التيكتاليك، أعد الرسم التوضيحي لبرنامج *Animal Armageddon* لصالح قناة كوكب الحيوانات **Animal Planet** (العمل الفني من قبل ألفونس دي لاتوري Alfonse de la Torre بالمشاركة مع بيتر وورد **Peter Ward** واستُخدم بإذن من شركة Digital Ranch Productions لصاحبها: روب كيرك **Rob Kirk**)

[illegible]

[illegible]

عصر مفصليات الأرجل: ما بين [illegible] مليون سنة مضت

[illegible]

[illegible]

ارتفاع تركيز الأكسجين الكربوني - البرمي

مع أنّ شتى المتخصصين بنمذجة تركيب الغلاف الجوي في الماضي يختلفون في تقديراتهم لقيم الأكسجين، فإن كل واحد منهم يشير إلى وجود إجماع على وجود فترات زمنية في الماضي ارتفعت فيها تراكيز الأكسجين بصورة غير عادية، وتمتد من 320-260 مليون سنة مضت، مع بلوغ قيم عظمى قرب نهاية هذا الفترة الزمنية شكّل العصر الكربوني (نذكّر أنّه يُقسّم في أمريكا الشمالية إلى العصرين الميسيسيبي والبنسيلفاني) والنصف الأول من العصر البرمي الذي تلاه أوقات ارتفاع تركيز الأكسجين. وقد تركت الكائنات الحية في العالم من ذلك الوقت أدلةً واضحة على ارتفاع تركيز الأكسجين، وخير دليل على ذلك هو حشرات ذاك الزمن.

وصف نك لين Nick Lane ذروة الأكسجين في الكربوني (وأموراً كثيرة أخرى) في كتابه الأكسجين *Oxygen* الصادر في عام 2002.[1] وكتب لين في فصل بعنوان "يعسوب بولزوفر" Bolsover عن يعسوب أحفوريٍّ اكتشف عام 1979 وبلغ باعُ جناحيه نحو عشرين بوصة [50 سم]. كما عرف شكل أكبر من أحافير العصر الكربوني، وكان أيضاً يعسوباً باعُ جناحيه ثلاثين بوصة [75 سم] وهو وحش جدير باسمه، ميغانيورا *Meganeura*، إلا أنه لا يزال مجرد يعسوب آخر. ولم تكن الأجنحة وحدها كبيرة الحجم، بل أيضاً أجسام هذه العمالقة كانت أكبر بشكل يتناسب مع أجنحتها، بعرض بوصة واحدة [2.5 سم] وطول قدم واحدة [30 سم]، وهذا قريب من حجم النورس. وبينما لا ترتبط النوارس في أي جملة بكلمة «عملاق»، فإن حشرةً امتداد جناحيها يعادل عشرين بوصة هي بالفعل عملاق حقيقي. أما اليوم، على سبيل المقارنة؛ فقد يصل باع جناحي اليعسوبيات إلى أربع بوصات [10سم]، لكنها أصغر من ذلك عند أغلبها. ومن العمالقة الأخرى التي عاشت في ذلك الوقت ذباب مايو (حورية الماء) Mayflies التي يبلغ باع أجنحتها تسع عشرة بوصة [47.5 سم]، وعناكب ذات أرجل بطول ثماني عشرة بوصة [46 سم]، وعقاربَ وكثيرات أرجل بطول ياردتين [183 سم] أو أكثر. ويمكن أن يصل وزن عقرب بطول ثلاث أقدام [92 سم] إلى خمسين رطلا [22.7كغم]؛ مما يجعله مفترساً هائلاً بين جميع الحيوانات البرية، بما فيها البرمائيات. ولكنْ، وكما سنرى لاحقاً، فقد طورت البرمائيات أيضاً أنواعاً عملاقة خاصة بها.

وبالنسبة إلى الحشرات، فإنّ طبيعةَ الأجهزة التنفسية عندها وكفاءتَها في استخلاص الأكسجين وإدخاله للأجزاء الأكثر عمقاً من أجسامها هي التي تحدد حجمها الأقصى.

وتستخدم جميع الحشرات جهازاً مكوّناً من أنابيبَ رفيعة ندعوها القصبات، يَعبر الهواء عبر هذه القصبات بشكل فاعل ثم ينتشر إلى الأنسجة. ويُسحب الهواء إلى داخل القنوات إما عن طريق تمدد وتقلص منطقة البطن بصورة منتظَمة، أو تخفق الحشرات أجنحتها لخلق تيارات هوائية حول فتحات القصبات، وبهذا يصبح نظام القصبات الهوائية أكثر كفاءة في كلتا الحالتين. وتتصف الحشرات الطائرة بأعلى سرعات استقلاب مقارنةً بأيّ حيوان آخر، وأظهرت الأدلة التجريبية أنّ ارتفاعَ تراكيز الأكسجين يمكّن اليعسوبيات من إنتاج سرعات استقلاب أعلى. وأظهرت هذه الدراسات أنّ اليعسوبيات هي حشرات محدودة الاستقلاب وربما الحجم أيضاً في تراكيز الأكسجين الحالية التي تبلغ 21 في المئة.

وهناك جدل حول ما إذا كانت تراكيز الأكسجين تتحكّم في حجم مفصليات الأرجل. وأفضل الأدلة على تأثير الأكسجين في الحجم هي تلك التي تأتي فعلاً من الدراسات على مزدوجات الأرجل (أمفيبودا) Amphipods، وهي مفصليات أرجل بحرية صغيرة واسعة الانتشار في المحيطات والبحيرات في عالمنا. وقام كلّ من غوتييه شابيل Gauthier Chapelle ولويد بيك Lloyd Peck بفحص ألفَي عينة من مجموعة موائلَ متنوعة واكتشفا أنّ المسطحات المائية ذات محتوىً أعلى من الأكسجين المذاب تعيش فيها مزدوجات الأرجل ذات الحجم الأكبر. كما أجري المزيد من التجارب المباشرة من قبل روبرت دادلي Robert Dudley من جامعة ولاية أريزونا، الذي قام بتربية ذباب الفاكهة في شروط ارتفاع تركيز الأكسجين، واكتشف أنّ كل جيل من الأجيال المتعاقبة كان أكبر من سابقه عندما ارتفعت تراكيز الأكسجين إلى 23 في المئة. فتراكيز الأكسجين الأعلى تساعد على ازدياد الحجم بسرعة كبيرة، على الأقل عند الحشرات.[2]

ولم تكن تراكيز الأكسجين العامل الوحيد الذي سمح بظهور اليعسوبيات العملاقة؛ إذ يفترَض أنّ ضغط الهواء حينها كان أعلى أيضاً، أي إن الضغط الجزيءي Partial pressure للأكسجين كان يرتفع، إلا أن ذلك لم يكن على حساب باقي الغازات. وكان ضغط الغازات الكليّ أعلى مما هو عليه اليوم، والعدد الأكبر من جزيئات الغازات في الغلاف الجوي من شأنه أن يعطي العمالقة قوة رافعة أكبر. ومن الواضح أنّ الهواء احتوى على الأكسجين أكثر من اليوم، والسؤال هو لماذا؟

رأينا سابقاً أن تراكيز الأكسجين تتأثر بشكل رئيس بسرعات دفن الكربون المُختزل والمعادن الحاملة للكبريت كالذهب الكاذب (البيريت Pyrite)؛ فترتفع تراكيز الأكسجين

عند دفن كميات كبيرة من المادة العضوية. وإذا كان ذلك صحيحاً، فهذا يعني أنّ العصر الكربوني، وهو الوقت الذي وجد فيه أعلى محتوى من الأكسجين على الأرض، يجب أن يكون وقتاً حدث فيه دفن كميات ضخمة من الكربون والبيريت بسرعة، وتثبت الأدلة في سجل التتابع الطبقي (الستراتيغرافي) Stratigraphic record أنَّ ذلك حصل فعلاً من خلال تكوين ترسبات الفحم.

ونحن نبحث هنا في فترة زمنية طويلة؛ سبعين مليون سنة، وهي أطول من الوقت الفاصل بين آخر الديناصورات ويومنا الحاضر، في وقت ارتفاع تركيز الأكسجين الذي يبلغ عمره 330-260 مليون سنة. واتضح أن تسعين في المئة من ترسبات الفحم في الأرض وجدت في الصخور التي تعود إلى ذلك الوقت، إذ كانت سرعة دفن الفحم أعلى بكثير من أي وقت آخر في تاريخ الأرض: أعلى بـ600 مرة، في الواقع، حسب نك لين في كتابه الأكسجين. ولكنّ مصطلح «دفن الفحم» Coal burial غير دقيق إلى حدّ بعيد، فالفحم هو بقايا الخشب القديم، وهكذا نرى الوقت الذي دفنت فيه وبسرعة كميات هائلة من الأشجار المتهاوية، وبعد ذلك فقط تحولت إلى فحم بتأثير الحرارة والضغط. وكان العصر الكربوني هو الوقت الذي حدث فيه دفن الغابات على مستوى مذهل.

ولم يقتصر دفن المادة العضوية في العصر الكربوني على نباتات اليابسة. بل يوجد كثير من الكربون المرتبط بالعوالق النباتية والحيوانية في المحيطات، وهي المكافئات المحيطية للغابات الأرضية، إذ تراكمت كميات كبيرة من الرواسب الغنية بالمواد العضوية في قيعان البحار. إنّ السببَ الرئيس وراء هذا التراكم الفريد للكربون، والذي أدى بدوره للوصول إلى تراكيز قصوى غير مسبوقة للأكسجين، هو تزامن عدّة أحداث جيولوجية وبيولوجية بلغت أوجَها في وقت تراكمات ترسبات الكربون الضخمة. أولاً، كانت القارّات المعروفة في يومنا هذا ملتحمةً بقارّة واحدة كبيرة بسبب انغلاق المحيط الأطلسيّ القديم، فتصادمت أوروبا بأمريكا الشمالية وأمريكا الجنوبية بإفريقيا، وبرزت سلسلة جبال عملاقة طولية على امتداد دروز التحام هذه الكتل القارّية.

ونشأت على جانبي هذه السلسلة سهول فيضية كبيرة، كما أنتجَ تشكّل هذه الجبال مناخاً رطباً شمل أغلب مساحة الأرض. واستعمرت الأشجار التي تطورت حديثاً المستنقعات الشاسعة واليابسة الجافة المحاذية التي خرجت إلى الوجود. وكان كثير من هذه الأشجار ستبدو خيالية بالنسبة إلينا في غرابتها، وإحدى الصفات الأكثر غرابة هي

كون نظام جذورها ضحلا جداً، إذ كانت تنمو إلى أطوال شاهقة وتسقط على الأرض بسهولة تامة. ويوجد العديد من الأشجار المتهاوية في عالمنا لكن لا شيء يشبه تراكم الكربون. فالعوامل حينذاك لم تقتصر قطُّ على مجرد عالَم مستنقعات مثالي لنمو النباتات.

فالغابات التي خرجت إلى الوجود منذ 375 مليون سنة تألفت من الأشجار الحقيقية الأولى التي استخدمت اللّيغنين والسيلّيولوز لدعم هياكلها. والليغنين هو مادة قاسية جداً ويتفكك اليوم بفعل مجموعة متنوعة من البكتيريا. وحتى بعد مرور 400 مليون سنة تقريباً، فإن البكتيريا تقوم بهذه المهمة على مهل وببطء شديد.[3] إذ يتطلب «تفسخ» Rot شجرة متهاوية سنوات طويلة، وبعض أنواع الخشب الأكثر صلابة تستغرق وقتاً أطول بعد، لاحتوائها على ليغنين أكثر مقارنة بما يُدعى بالخشب الطري كالأرْز والصنوبر.

ويتحلّل الشجر بأكسدة جزء كبير من كربون الشجرة، ومن ثمَّ حتى في حال دفن الناتج النهائيّ لن يصل إلا القليل القليل من الكربون المُختزَل إلى السجل الجيولوجي. أما في العصر الكربوني؛ فلم يكن هناك كثير من أنواع البكتيريا التي تُحلّل الخشب، وربما لم يكن هناك أي بكتيريا محللة للخشب حينها،[4] وسبب ذلك هو عجز الميكروبات عن تدمير المادة الهيكلية الأساسية للخشب، أي مادة اللّيغنين. فقد كانت الأشجار في ذلك العصر تسقط لكنها لم تكن تتحلل. وفي نهاية المطاف ستتغطى الأشجار غير المتحللة برواسب فيدفن الكربون المُختزَل خلال العملية. وبوجود جميع هذه الأشجار (إلى جانب العوالق في البحار) التي تنتج الأكسجين بعملية البناء الضوئي، واستخدام القليل جداً من الأكسجين الجديد لتفكيك الغابات التي تنمو وتسقط بسرعة، فإن تراكيز الأكسجين بدأت بالارتفاع.

تراكيز الأكسجين وحرائق الغابات

كانت لذروة الأكسجين في العصر الكربوني عواقب أخرى إلى جانب العملقة، فالأكسجين مادة مساعدة على الاحتراق، أي كلما وجد أكسجين أكثر كان الحريق أكبر؛ فهو يسهّل اشتعال الوقود، والوقود الذي نتكلم عنه هنا ما هو إلا الغابة العالمية الضخمة من العصر الفحمي Coal age.

وربما شهد العصر الكربوني أكبر حرائق الغابات التي سبق وحدثت على الأرض (على الأقل حتى سقوط كويكب تشيكشولوب Chicxulub astroid الذي قتل الديناصورات وتسبَّب بحرائق الغابات منذ 65 مليون سنة مضت). وكانت الدراسات التي تناولت

احتمال كون الحرائق الضخمة محرّضةً بارتفاع تراكيز الأكسجين الجوي موضعَ جدل، شأنها في ذلك شأن كثير من الدراسات حول تغيّر تراكيز الأكسجين مع الوقت، لكن هذه الخلافات آخذة بالتراجع مع تراكم مزيد من الأدلة. وبالفعل شكّل الجدل القائم حول حرائق الغابات انتقاداً كبيراً لكامل النظرية القائلة إنّ تراكيز الأكسجين كانت مختلفة في الماضي (بما فيها التراكيز الأعلى). وقد اقتُرح أنّ الغابات القديمة لم يكن بإمكانها النجاة من الحرائق الكارثية، وأنه لمّا كان لدينا سجل أحفوري طويل لتلك الغابات، فإننا نستطيع القول إن الحرائق الكارثية لم تحدث.

ولكنْ، ينبغي أن تتسبّبَ الشروط المتمثلة بارتفاع تركيز الأكسجين، من الناحية النظرية على الأقل، بزيادة سرعة انتشار النيران إلى جانب حدوث حرائقَ أكثر شدة. وبالفعل، فإن وجود ترسّبات كبيرة للفحم الأحفوري في الصخور الرسوبية في العصرين الميسيسيبي والبنسيلفاني[5] في أمريكا الشمالية يقدّم أدلة على حدوث حرائق الغابات آنذاك: كانت حرائق الغابات أكبرَ وأشدّ وأكثرَ تواتراً مقارنة باليوم، على الرغم من أن مثل هذه المقارنة المباشرة غير دقيقة نظرا للاختلاف البيولوجي الكبير في بنية الغابات بين ذلك الوقت واليوم.

وإذا كانت حرائق الغابات أكثر عدداً وشدة، نتوقع رؤيةَ تكيّفات مورفولوجية لمقاومة الحرائق مع مرور الوقت. وقد طورت النباتات مجموعة معروفة جيداً من التكيّفات التي تعرف مجتمعة بصفات مقاومة الحرائق، ومنها أن يكون اللحاء أسمك ووجود نسيج وعائي عميق التموضع Cambria مع أغماد من الجذور الليفية تحيط بالجذع.

قد نتساءل لماذا لَم يتسبّب مثل هذا الأكسجين المرتفع باحتراق الغابات خلال العصر الكربوني وتحولها إلى رماد. بينما يبدو أنّ الحرائق آنذاك كانت أكثر تواتراً فعلاً، إلا أن ضررها كان محدوداً بفعل وجود النباتات المقاومة للحرائق والمحتوى العالي من الرطوبة في النباتات بحدّ ذاتها من جهة، وفي الأراضي السّبخة التي غطّت أجزاءً كبيرة من سطح الأرض في مستنقعات الفحم المتعددة من جهة ثانية. ومن المهم أيضاً أن نأخذ بعين الاعتبار درجةَ حرارة «الشرارة» التي أطلَقت حرائق الغابات. وفي دراسات حديثة[6] تبحث في تراكيز الأكسجين وعلاقتها بإمكانية احتراق الخشب، فقد ذكر المحققون أنّ النباتات لا تشتعل إذا كانت تراكيز الأكسجين أقل من 11-12 في المئة تقريباً، ولكنهم حاولوا إشعال هذه الحرائق بعود ثقاب عوضاً عن درجات الحرارة الأعلى بكثير التي تنتجها أي صاعقة.

تأثير ارتفاع تركيز الأكسجين في النباتات

تحتاج النباتات إلى الأكسجين، مثلها مثل الحيوانات، لمواصلة حياتها. ويدخل الأكسجين إلى الخلايا خلال عملية التنفس الضوئي Photorespiration. ولكنّ تراكيزَ الأكسجين التي تحتاج إليها النباتات أقلّ بكثير من الحيوانات في أغلب الأحيان. ويوجد فرق آخر وهو اختلاف الأجزاء المتنوعة للنباتات الأرضية، على سبيل المثال، في حاجتها من الأكسجين، إذ تعيش معظم النباتات في وسطين شديدي الاختلاف: جزء من النبات يوجد في الهواء، وجزء آخر (أي الجذور) يوجد في التربة. إنّ البيئتين المختلفتين جداً للجذور الكائنة تحت الأرض والمحاطة بالماء والأجسام الصلبة والغازات تختلف في احتياجاتها التطورية كثيراً. وتوجد الأوراق في الهواء، حيث يشكّل كلّ من فقدان الماء والحصول على القدر الكافي من الضوء وتجنّب الغمر في كثير من الماء مصادرَ قلق لها (هذا لو كانت الأوراق تستطيع أن تقلق). أما عند الجذور في الغالب فهو متطلب غير ضروري للأوراق، وهو التركيز الملائم من الأكسجين. هذا، وإنّ نظامَ الجذور هو الأكثر عرضةً للضرر والموت الخلوي جرّاء انخفاض الأكسجين، ويبدو كلّ ذلك مألوفاً بالنسبة إلى البستانيين ومالكي النباتات المنزلية الذين يفرطون في سقاية نباتاتهم. وتعيش الجذور في البيئة تحتَ الأرض حيث تصادِف الشروط قليلة الأكسجين، حتى في الأوقات التي يكون فيها الهواء مؤكسَجاً بشكل جيد، لا سيما إذا وجدت كميات زائدة من الماء في التربة، إذ يمكن أن تُخنَق الجذور من قبل المياه الجوفية ذات تراكيز الأكسجين المنخفضة على سبيل المثال.

ماذا عن النباتات وتراكيز الأكسجين المرتفعة؟ توجد معطيات أقلّ بكثير في هذا الصدد، ولكنّ المعلومات المتوفرة تشير إلى أنّ التراكيز المرتفعةَ من الأكسجين ضارة بالنباتات. ويؤدي ارتفاع تراكيز الأكسجين في الهواء إلى تزايد سرعات التنفس الضوئي. لكنّ العاقبة الأكثر خطورة لتراكيز الأكسجين الأعلى هي تَشكّل موادَ كيميائية أكثر سمية تدعى جذور الهيدروكسيل Radicals OH الخطرة على الخلايا الحية. ولدراسة هذه الاحتمالات بشكل أوسع قام ديفيد بيرلينغ David Beerling، وهو تلميذ سابق لبوب بيرنر Bob Berner من جامعة ييل، بتربية نباتات متنوعة في حجرات مغلقة في تراكيز أكسجين أعلى من يومنا هذا.[7] وعندما ارتفعت تراكيز الأكسجين إلى 35 في المئة (والتي يعتقد أنها أعلى تراكيز للأكسجين في التاريخ، وحصلت في الكربوني المتأخر أو البرمي الباكر)، فقد انخفض صافي الإنتاجية الأولية (وهو مقياس لنمو النباتات) بمقدار الخمس.

ومن المحتمَل أنّ تراكيز الأكسجين الأكثر ارتفاعاً في الكربوني وحتى البرمي الباكر سبّبت تراجعاً إلى حدّ ما في الحياة النباتية، مع أنه لا يمكن ملاحظة ذلك في السجل الأحفوري من خلال أيّ تغيّر دراماتيكيّ أو انقراض جماعيّ في تلك الفترة الزمنية.

الأكسجين وحيوانات اليابسة

تطلّب استعمار اليابسة من قبل الحبليات Chordates -سلالتنا- كثيراً من التكيّفات الكبرى، وكان أكثرها إلحاحاً هو إيجاد وسيلة للتكاثر تسمح للجنين Embryo بالنمو داخل البيضة خارج الماء. ومن المفترَض أنّ البرمائيات في البنسيلفاني والبرمي بقيت تضع بيوضها في الماء، ومن ثمّ لم يكن بإمكانها استغلال موارد اليابسة التي تخلو من البحيرات أو الأنهار. وحلّت هذه المشكلة بتطوّر ما يدعى بالبيض الرهَلي Amniotic egg. ومن المفترَض كذلك أن هذه البيضة هي التي كفلت وجودَ سلالة الفقاريات التي تعرف الآن بالزواحف. إنّ تطور البيض الرهَلي هو الذي يميز الزواحف والطيور والثدييات عن أجدادها البرمائيات.

ويشير السجل الأحفوري إلى وحدة سلائف الرهَليات Amniotes: أي إن لها جدّاً واحداً مشتركاً فقط، ولم تنشأ هذه الحالة أكثر من مرة. وقد عاش ذلك الجدّ البرمائي في وقت ما من العصر الميسيسيبي، ومن ثمّ، فقد حدث هذا الانتقال الحاسم عندما كانت تراكيز الأكسجين آخذة بالارتفاع. وأنتج البيض الرهَلي على الأرجح عند تراكيز أكسجين مساوية لما هي عليه اليوم أو حتى أعلى منها.

وتعتبر الزواحف أيضاً وحيدة السلائف، إذ تباعدت Diverged مجموعة من نوع واحد عن الأجداد البرمائية في وقت ما من العصر الميسيسيبي منذ أكثر من 320 مليون سنة، وكما رأينا كان ذلك وقتَ تزايد الأكسجين، إلى جانب كونه الوقت الذي حصل فيه تنوُّع كبير للبرمائيات التي تعيش في اليابسة والماء. ولكن، بينما يمكن أن يعود تأريخ الأدلة الجينية على هذا التباعد إلى 340 مليون سنة مضت، فقد اكتُشِفت أحافيرُ نُسبت إلى الزواحف الأولى (لا البرمائيات الأرضية) من مواقع مختلفة في العالم. ووجدت أحافير الزواحف الصغيرة المسماة هايلونوموس (ساكنات الغابات) *Hylonomus* وباليوثايريس *Paleothyris* مدفونةً في جذوع الشجر المتحجرة في العصر البنسيلفاني الباكر. وربما كان ظهور سجلّها الأحفوري في وقت متأخر أكثر

صحةً من افتراض تطور هذه المجموعة في العصر الميسيسيبي. وفي كلتا الحالتين، فإنّ أحافير هذه الزواحف صغيرة جداً ويتراوح طولها عادة بين 4-6 بوصات (10-15 سم).

وكانت جماجم الزواحف الصغيرة هذه خاليةً من طبلة الأذن Tympanum ومن ثمّ لم تكن قادرةً على السمع جيداً، أو إطلاقاً، وبخلاف البرمائيات مُعقَّدة الأسنان Labyrinthodont، كانت تفتقر إلى وجود زوج من الأنياب الكبيرة الموجودة عند معظم البرمائيات آكلات اللحوم الأكبر حجماً. وكان للزواحف الصغيرة، بخلاف هذه البرمائيات الضخمة، هيكل خلف القحف تكيّف للقيام بالتنقّل على نحو أفضل، وأسرع طبعاً. وكانت لها أذيال طويلة جداً بالنسبة إلى أجسامها.

ولا يزال الاعتقاد أنّ هذه الأشكال هي التي وضعت البيوض الرهَلية الأولى مجرّد تكهّن. فلم تُشاهد البيوض الأحفورية في السجل الطبقي حتى البرمي الأدنى، ويبقى هذا الاكتشاف الوحيد مثيراً للجدل. غير أن السبيل إلى البيضة الرهَلية مرّ على الأرجح من خلال بيضة شبيهة ببيضة البرمائيات (أي دون غشاء من شأنه أن يقلّل الجفاف) ولكنْ توضع في مكان رطب على اليابسة. وربما كان تطور مجموعة من الأغشية التي تحيط بالجنين (غشاء الكوريون Chorion وغشاء الرهَل Amnion) وتغطى بطبقة جلدية أو كلسية مسامية ضرورياً للتكاثر الأرضي بالكامل. وأحد الاحتمالات التي لم تذكر قطّ هو أنّ رباعيات الأرجل هذه قد طورت الولادةَ Live birth، بحيث لا تولد الأجنة إلا بعد حدوث النمو الضروري داخل الأنثى.

وأخيراً ظهرت على اليابسة البيوضُ التي تستطيع إنتاج ذرية قابلة للحياة، ولابدّ من أن كلاً من تركيز الأكسجين والحرارة قد أدى دوراً بالنسبة إلى البيوض الرهَلية. وهناك مقايضة صعبة في التكاثر بالنسبة إلى أي من حيوانات اليابسة الذي يستخدم استراتيجية وضع البيض؛ إذ يجب الحفاظ على الرطوبة، ومن ثم يجب أن تكون مسامات البيضة صغيرة وقليلة، لكنّ انخفاض نفوذية البيضة لتسرب الماء من الداخل إلى الخارج يقلّل أيضاً من انتشار الأكسجين لداخلها.[8]

ولا تستطيع البيضة أن تتطور بلا أكسجين. ولربما كان تطور الرهَليات الأولى في وقت ارتفاع تركيز الأكسجين ليس مجرد مصادفة. ويبدو أن تأثر هذه الاستراتيجية التكاثرية في الماضي والحاضر بمحتوى الأكسجين الجوي عند الحيوانات التي تعيش على ارتفاعات مختلفة هو أمر لا مفرّ منه، إذ يؤدي المحتوى الأكثر ارتفاعاً من

الأكسجين إلى نمو الجنين على نحو أسرع. ويحتمل أن الأكسجين المرتفع سمح بتطور الولادة. واقترح بعض علماء البيولوجيا أن الولادة لا يمكن أن تحدث، على الأقل عند الثدييات، لأن المشيمة تقوم بإيصال الأكسجين بتراكيز أقلّ مما هو موجود حتى في شرايين الأم. لكنّ هذا التعميم يصحّ فقط بالنسبة إلى الثدييات، إذ يحدث كثير من النمو في بيئة يمكن فيها تنظيم تراكيز الأكسجين ودرجة الحرارة وكمية السائل، في حين تكون البنية التشريحية التكاثرية للزواحف التكاثرية مختلفةً جداً. ويحتمل أن تراكيز الأكسجين المنخفضة تؤدي إلى تفضيل الولادة. وتأتي الأدلة التي تدعم ذلك من ثلاثة محاور. أولاً، من المعروف جيداً أنّ الطيور (وهي تضع البيض) التي تعيش في الموائل عالية الارتفاع تتغذى عادةً على ارتفاعات أعلى من الحدّ الأقصى الذي تستطيع أن تتكاثرَ فيه.

وتتبع الارتفاعات القصوى التي تُبنى فيها أعشاش العديد من أنواع الطيور الجبلية هذا النموذج في الغالب. فتقع الأعشاش الأكثر ارتفاعاً على علوّ 18000 قدم (نحو 5.5 كم)، ولن تنجح الأجنة بالتطور عند ارتفاعات أعلى من ذلك.[9] ومع أنّ ثلاثة عوامل على الأقل تشارك في وضع هذا الحدّ (وهي انخفاض المحتوى من الأكسجين مع الارتفاع والجفاف نتيجة جفاف الهواء ودرجات الحرارة المنخفضة نسبياً في المرتفعات)؛ فلعلّ محتوى الأكسجين أهمّها.

ثانياً، أظهرت تجارب حديثة أجراها جون فاندن بروكس John Vanden Brooks من جامعة ييل أنّ بيضَ التمساح الأمريكي إذا أخذ من براثن الطبيعة ليُربى في تراكيز أكسجين أعلى؛ أظهر سرعات نمو أعلى بكثير من الطبيعي. أما الأجنة؛ فقد نمت أسرع بنحو 25 في المئة من مجموعات التحكم Control group التي احتفظ بها في تراكيز طبيعية من الأكسجين الجوي. إنّ زيادة تراكيز الأكسجين تؤثر بشكل واضح في سرعات النمو، على الأقل عند التمساح الأمريكي. وأخيراً يؤكّد راي هيوي Ray Huey، من جامعة واشنطن، أنّ نسبة الزواحف التي تلِد وتعيش في الارتفاعات العالية أكبر مقارنة بمثيلتها على ارتفاعات أقل.

ومع انبثاق الفقاريات رباعية الأرجل من أجدادها السمكية، تعيّن عليها أن تتجاوز العديد من التحديات التشريحية؛ فالماء لم يعد موجوداً لدعم جسم الحيوان، ففي الهواء ينبغي أن يتحقق الدعم والتنقل بواسطة الأرجل الأربع. وكان لابدّ من تطور

حزام الكتف والحوض بتصميم جديد كلياً، إلى جانب العضلات التي تسمح بالتنقل. وكانت مشكلة الحصول على الأكسجين الكافي من أجل القيام بجهد بدني مستمرّ لا تقل أهمية عن السابقة. واستخدمت رباعيات الأرجل الباكرة على ما يبدو المجموعة نفسها من العضلات للحركة والتنفس، ولم تكن قادرة على التحرك والتنفس في آن واحد. أما الأسماك؛ فيبدو أنها لم تكن تعاني مشكلةَ الجهد البدني المستمر أو التنفس خلال نشاطها؛ مما يدل على أنّ الأكسجين لم يكن عاملاً محدّداً للنشاط اليومي. ولم تكن الحال كذلك بالنسبة إلى رباعيات الأرجل البرية. وقد وفرت مخططات أجسام أقدم رباعيات الأرجل على اليابسة وضعيةَ التمدد Sprawling مع تباعد الأطراف على جانبي الجذع. وعند المشي أو الركض مع مخطط جسم كهذا يندفع الجذع أولاً نحو أحد الجانبين ثم نحو الآخر على نحو متلوّ. وعندما تتحرك الرّجل اليسرى نحو الأمام ينضغط الجانب الأيمن من الصدر والرئتين، وتكون العملية معكوسةً في الخطوة التالية.

إنّ انحراف الصدر في أثناء هذا النوع من الحركة يجعل التنفسَ «الطبيعي» مستحيلاً؛ إذ ينبغي أخذ كلّ نفس بين خطوتين متتاليتين، إلا أن هذه العملية تجعل تنفس الحيوان في أثناء الركض مستحيلاً. وهكذا نرى أنّ البرمائيات والزواحف المعاصرة لا تستطيع أن تركض وتتنفس في الوقت نفسه، وذلك حجة قوية على أن أجدادها في الحقبة الأولية كان مُعاقة بالطريقة نفسها. ولهذا السبب لا تعدو الزواحف بسرعة كبيرة. وللسبب نفسه تعتبر البرمائيات والزواحف حيوانات مفترسة متربّصة، فهي لا تطارد فريستها. وأفضل الزواحف الحديثة في الركض هو تنّين كومودو Komodo dragon الذي يستطيع أن يعدو لمسافة لا تتجاوز الثلاثين قدماً [تسعة أمتار] عند مهاجمة فريسته، وهذا ما يعرف بتقييد كارير Carrier's constraint، على اسم مكتشفه عالم الفيسيولوجيا ديفيد كارير David Carrier.

لقد شكّلت معضلة عدم القدرة على التنفس والتحرك السريع في ذات الوقت عائقاً كبيراً أمام استعمار اليابسة. وكان من الممكن أن تكون أول رباعيات الأرجل البرية في وضع أسوأ حتى بالمقارنة بمفصليات الأرجل البرية كالعقارب؛ لأنّ الفقاريات كانت بطيئة وتحتاج إلى التوقف باستمرار كي تتنفس. ولذلك، نحن نؤكّد على كون تراكيز الأكسجين حاسمةً: فلم يكن عند فقاريات اليابسة الأولى أي فرصة للنجاح في الحياة على البرّ إلا في ظلّ شروط ارتفاع تركيز الأكسجين.

وكانت إحدى النتائج المترتبة على تلك المشكلة هي أنّ البرمائيات والزواحف الباكرة طورت قلباً ثلاثيّ الحجرات. ويوجد قلب من هذا النوع لدى معظم البرمائيات والزواحف الحديثة، وهو تكيّف عند المخلوقات التي تعاني مشكلة ضعف التنفس في أثناء التحرك. فالسحلية لا تتنفس عندما تطارد فريستها، ولذلك فإنّ وجود حجرة رابعة في القلب، ستقوم بضخ الدم إلى الرئتين، لا لزومَ له. وتستخدَم الغرف الثلاث لضخّ الدم في جميع أنحاء الجسم، إلا أن السحلية يجب أن تدفع ثمن ذلك، فهي ستستغرق وقتاً أطول لإعادة أكسجة الدم عندما يتوقف نشاطها.

الأكسجين ودرجة الحرارة والتكاثر وتنظيم الحرارة

نستطيع عند هذه النقطة تلخيصَ ومناقشة المتغيّرات المتعلقة بتكاثر حيوانات اليابسة، ومحاولة ربطها بالقوانين العامة المتعلقة بتراكيز الأكسجين ودرجة الحرارة. وكما سبق ورأينا، توجد استراتيجيتان محتمَلتان: وضع البيض، أو الولادة. وبالنسبة إلى البيض، فإما أن يكون محاطا بقشرة كلسية أو محاطا بغطاء جلدي أكثر ليونة. وتلجأ جميع الطيور اليوم إلى وضع البيض الكلسي في حين تستخدم الزواحف البَيوضة الموجودة في يومنا كلها البيض ذي الغطاء الجلدي. ومع الأسف، لا يوجد إلا القليل من المعلومات عن سرعات انتشار الأكسجين في البيض الجلدي - أو الرقّي Parchment - مقارنة بالبيض الكلسي.

هذا وتترتب على استخدام أيّ من الطريقتين (أي وضع البيض والولادة) نتائج مهمة لحيوانات اليابسة. فالأجنّة التي تمت بالولادة غير مهدَّدة بتغير درجة الحرارة والجفاف والحرمان من الأكسجين، ولكن ذلك يتمثل بالزيادة الطارئة على حجم الأم التي تجعلها، باستمرار، أكثر عرضة للافتراس إلى جانب حاجتها إلى كميات إضافية من الطعام تفوق حاجة الحيوان البالغ بمفرده. وبينما لا تتحمل الحيوانات التي تضع البيض عبء هذه المشكلة، فإنها تخلصت منها مقابل بيئة أقل أماناً. فالوسط الداخلي للبيضة يوجد بكامله خارج جسم الحيوان؛ مما يرفع معدلات موت الأجنّة نتيجة الافتراس أو الظروف البيئية الخارجية المميتة.

وتباعدت ثلاث سلالات كبيرة من الزواحف عن بعضها قبل نهاية العصر الميسيسبي لتصبح كلّ منها مجموعة مستقلة بذاتها: أنتجت الأولى الثدييات، والثانية السلاحفَ، والثالثة مجموعات الزواحف الأخرى، بما فيها الطيور. ويظهر السجل الأحفوري وجود

أنواع عديدة فردية تؤلف هذه المجموعات الثلاث. ومكّننا السجلُ الأحفوري الغنيّ نسبياً من رسم الخطوط الكبرى للمسار التطوري لها، وقد تطلب ذلك أيضاً إعادة تقييم لماهية «الزواحف». ويضم صف الزواحف كما هو متعارف عليه كلاً من السلاحف والسحالي والتماسيح الموجودة في يومنا هذا. وعملياً يمكن تعريف الزواحف اليوم بما هي ليست عليه: فهي رهليات تعوزها الخصائص المميزة للطيور والثدييات. لكن لا يُولى كثير من الانتباه إلى أن هذه السلالات الثلاث نشأت جميعها في عالم من الجليديات الواسعة والأكسجين المرتفع جداً. ويفترَض هنا أنّ المجيء من عالم بارد مرتفع الأكسجين لابدّ أن يكون قد أثّر في العديد من الجوانب البيولوجية لهذه الحيوانات. دعونا نلقِ نظرةً على بعض هذه الخصائص.

وأحد الأسئلة الدائمة المتعلقة بتاريخ الحياة يهتم بتاريخ تنظيم حرارة الحيوانات. وتوجد ثلاثة أنواع متميزة: الحيوانات داخلية الحرارة (ذوات الدم الحار)، وخارجية الحرارة (ذوات الدم البارد)، والفئة الثالثة تضم متغايرات الحرارة، وهي بالأساس لا تنتمي إلى أيّ من الفئتين السابقتين وتترافق بحجوم كبيرة جداً. لطالما جذب تطور هذه الفئات الثلاث الاهتمامَ والتمحيصَ العلمي إلى جانب سبل تنظيم الحرارة، والسؤال الأهم هو عمّا إذا كانت الديناصورات من ذوات الدم الحار أم لا، بصفته الموضوع الأكثر مناقشةً والأكثر إثارة للجدل. ويعود الجزء الأكبر من تلك الخلافات إلى كون كل هذه الخصائص إما خصائص فيسيولوجية أو كونها تتضمن أجزاء من الجسم (مثل الفرو) التي نادراً ما تترك سجلات أحفورية.

نحن نعلم أن كل الثدييات والطيور الحيّة هي من ذوات الدم الحار، إذ تمتلك الأولى شعراً والثانية ريشاً، وأنّ الزواحف الحيّة كلها من ذوات الدم البارد وليس لها شعر أو ريش. أما حالة الأشكال المنقرضة؛ فتبقى موضع جدل. ومن المثير للاهتمام هنا ما إذا كانت تراكيز الأكسجين و/أو درجات حرارة العالم المميزة قد أثرت أو لم تؤثر في تنظيم الحرارة و/أو غطاء الجسم المميز للسلالات المختلفة التي عاشت في الماضي.

تمايز الزواحف

يعتبر عدد الفتحات في الجمجمة طريقةً ملائمة لتمييز السلالات الثلاث الكبرى من «الزواحف».[10] فلم يكن عند الأنابسيدات Anapsids (أجداد السلاحف) أي فتحة

أو ثقب كبير في جمجمتها، بينما كانت للسينابسيدات Synapsids (أجداد الثدييات) واحدة فقط. أما الديابسيدات (أجداد الديناصورات والسحالي والأفاعي)؛ فلها فتحتان. ويشير السجلّ الأحفوري إلى أنّ المجموعات الثلاث ظهرت في وقت ارتفاع تركيز الأكسجين الجوي.[11] واكتشف العضو الأقدم في المجموعة الأخيرة - الديابسيدات - في صخور أواخر البنسيلفاني، وكان صغيرَ الحجم إذ بلغ طوله الكلي 20 سم تقريباً. ومنذ وقت نشوء هذه المجموعة وحتى بداية انخفاض الأكسجين الذي بدأ على الأرجح بشكل مهم منذ 260 مليون سنة في الجزء الأوسط والمتأخر من العصر البرمي؛ فإنها لم تتطور كثيراً من حيث التنوّع أو التخصّص، فبقيت صغيرةَ الحجم. وبينما يحتمل أن الانقسام إلى مجموعات الديابسيد المتنوعة قد حدث في أواخر البنسيلفاني وحتى البرمي الباكر (وقت الارتفاع الأقصى للأكسجين)، فقد ظلّت الحيوانات بحدّ ذاتها صغيرةً وشبيهة بالسحالي، ولم يكن شكلها يوحي أنها ستكون أجداداً لأضخم حيوانات اليابسة التي ستظهر على سطح الأرض على هيئة ديناصورات الحقبة الوسطى. وإذا كانت ذروة الأكسجين قد حثّت الحشرات على بلوغ حجمها الأقصى، فإن هذا لا ينطبق على الديابسيدات.

والسؤالان الأكثر إلحاحاً عن هذه المجموعة هو ما إذا كانت من ذوات الدم الحار وكيفية تكاثر أفرادها، إذ لم يكتشف أي بيوض مؤكدة لأي من هذه المجموعات في البرمي ومن ثمّ لايمكننا أن نعلم كيفية تكاثرها. ومن المفترَض أنها وضعت بيوضاً رهلية بدائية ذات غشاء جلدي على اليابسة، لكننا لا نستطيع أن ننفي احتمال الولادة. ولم تكن عند الديابسيدات - قبل أواخر البرمي وأوج أزمة الأكسجين التي أدت إلى واحد من أعظم الانقراضات - حوافزُ للشروع في التنوُّع التي اشتهرت به لاحقاً؛ فهي السلف الذي نشأت عنه الديناصورات.

لقد طورت الديابسيدات أشكالاً تسمح بالحركة، وكانت آكلات لحوم رشيقة، في حين اتخذت مجموعة أخرى من الزواحف اتجاهاً مختلفاً. فلا يمكن لأحد أن يصف السلحفاة بأنها تمشي برشاقة، وهذا ما تحولت الأنابسيدات إليه: السلاحف، وقبل ذلك، إلى وحوش ضخمة كبيرة متثاقلة تعرف بالبارياصورات Pareiasaurs، وهي أحد أكبر الزواحف الهيكلية المعروفة من العصر البرمي المتأخر.

ولكن، من الصعب استنادا إلى مظهر أقدم ممثلي المجموعة التنبؤ بأن الأنابسيدات ستصبح بطيئة جداً وثقيلةَ الحركة ومختبئةً داخل درع، إذ إنها كانت في البداية أسرع

وأصغر وجدّ ناجحة خلال البنسيلفاني المتأخر ثم صارت أقلّ نجاحاً في البرمي. وعندما انحسرت الثلاجات الجليدية من الدور الجليدي الطويل الذي استمر طوال النصف الأول من العصر البرمي، فإن هذه المجموعة تطورت إلى أشكال عملاقة بما فيها الكوتيلوصورات Cotyolosaurs والبارياصورات الأكبر حجماً منها، وكانت هذه الأخيرة كائنات عاشبةً عملاقة مدرعةً وبطيئةَ الحركة بكل تأكيد وعاشت حتى نهاية البرمي تماماً. ومن المرجّح أنّ ارتفاع تركيز الأكسجين سمح للأنابسيدات الأقدم في العصر البرمي بلوغ هذا الحجم العملاق.

المجموعة الكبرى الأخيرة من الزواحف هي السينابسيدات، وهذه كانت أسلاف الثدييات، وإذا كانت الديابسيدات لم تبلَ إلا قليلاً خلال البنسيلفاني وحتى ذروة الأكسجين في البرمي الباكر، فلا يمكن أن يقال الشيء نفسه عن المجموعة الثالثة من الرهليات في ذلك الوقت، السينابسيدات، أي الزواحف الشبيهة بالثدييات. وعلى غرار الديابسيدات، عرفت السينابسيدات الأكثر بدائيةً من صخور البنسيلفاني، ومثلها أيضاً كان لأجداد الثدييات هذه جسم صغير وشكل شبيه بالسحالي وأسلوب معيشتها كان شبيهاً بها على الغالب. ومن المفترَض أنّ هذه السينابسيدات الباكرة كانت من ذوات الدم البارد شأنها شأن الديابسيدات (وشأن أسلافها البرمائيات). وهي بدورها أنتجت سلالتين كبيرتين: البيليكوصورات Pelyocosaurs (مثل الديميترودون *Dimetrodon* في البرمي الباكر)، وخلفائها الثيرابسيدات - وهي السلالة التي بعثت على نشوء الثدييات، وتعرف هذه السلالة الأخيرة أيضاً بالزواحف الشبيهة بالثدييات.

وبخلاف الديابسيدات، تباعدت السينابسيدات في أثناء ارتفاع تركيز الأكسجين، كما صارت عند ذروته الأكبرَ حجماً بين جميع فقاريات اليابسة. وفي القسم الأخير من البنسيلفاني، سلكت البيليكوصورات على الأرجح سلوك سحالي الورل الضخمة (أو حتى سحالي الإغوانا)، كما بدت شبيهة بها بأطرافها الممتدة من جوانب الجسم. ومع نهاية البنسيلفاني وصل بعضها إلى حجم تنين كومودو الحالي، وربما كانت كائنات مفترسة مخيفة، هذا وصارت البيليكوصورات تشكّل مع بداية العصر البرمي (منذ نحو 300 مليون سنة) 70 في المئة على الأقل من الحيوانات الفقارية على اليابسة. وإضافة إلى ذلك، تنوعت في أنماط تغذيتها أيضاً ووجدت ثلاث مجموعات هي: آكلات الأسماك، وآكلات اللحوم، والعواشب الضخمة الأولى.

استطاعت كلّ من الكائنات المفترسة والفرائس الوصول إلى حجم يقترب من خمس عشرة قدماً [أربعة أمتار ونصف] طولاً، كما كان لبعضها (مثل الديميترودون) شراع كبير على ظهرها؛ مما جعلها تبدو أكبر من ذلك. وإضافة إلى ذلك، تمكّنت هذه الكائنات جزئياً أو كلياً من حلّ مشكلة الزواحف المتمثّلة بعدم قدرتها على التنفس في أثناء الجري، عن طريق تغيير وقفتها، إذ تُظهر السينابسيدات نزعةً تطوّريةً لانتقال أرجلها إلى وضع تقع فيه قوائمها أكثر فأكثر تحت جذع الجسم، ولم تعد تمتد على الجانبين كما هي الحال في السحالي المعاصرة لنا. وأدى هذا إلى تحقيق وضعية أكثر انتصاباً ومن ثمّ فإنه أزال أو على الأقل خفّف بشكل كبير من انضغاط الرئة الذي يرافق المشية المتلوية للسحالي والسلمندر. وإذا كان هناك شيء من امتداد الأطراف خارج جانبي الجذع مازال مستمرا، فمن المؤكّد أن درجته كانت أقل مما كان عليه في رباعيات الأرجل الأولى، ثمّ إنه مع تطوّر الثيرابسيدات في البرمي الأوسط غدت الوضعية أكثر انتصاباً.

إن الشّراعَ الموجود لدى كلّ من اللواحم والعواشب في البنسيلفاني المتأخر والبرمي الباكر دليلٌ حاسمٌ على استقلاب البيليكوصورات. فقد استخدم كوسيلة تسخين سريع للحيوان في أثناء ساعات الصباح وعن طريق توجيه أشرعتها لتتبعَ أشعة الشمس الصباحية، استطاعت الكائنات المفترسة والفرائس على حدّ سواء تدفئةَ أجسامها الضخمة بسرعة؛ مما سمح لها بالحركة السريعة. والحيوان الأول الذي تمكن من تحقيق درجة حرارة داخلية دافئة كان سيصبح الرّابحَ في لعبة الافتراس أوالهروب، ومن ثم يفترض أن يكون الانتخاب الطبيعي Natural Selection قد عمل على تحقيق ذلك. إلا أن الدليل الأهم هو أنّ أجداد الثدييات، في أثناء ذروة الأكسجين، لم تكن قد طوّرت الحرارة الداخلية أو «الدم الحار» بعد. إذن، متى ظهرت هذه الصفة أول مرة؟ لابدّ أنّ الطفرة الثورية قد حدثت عند خلائف البيليكوصورات (أي الثيرابسيدات). كما يتعين علينا أن ننتبه لأن هذا العصر، إضافةً إلى كونه وقتاً لارتفاع تركيز الأكسجين، كان عصرَ انخفاض درجات الحرارة؛ فامتدت ثلاجات جليدية ضخمة في هذه الفترة الزمنية، كما أن أجزاءً واسعةً من المنطقتين القطبيتين لكل من نصفي الكرة الأرضية كانت مغطاةً بنوعي الجليد: القاري، والبحري.

بينما يأتي معظم فهمنا لتطور البيليكوصورات من أحافيرَ موجودة في أمريكا الشمالية، فإن الطبقات الرسوبية الأحدث هذه المنطقة تتصف بشحّ أحافير الفقاريات. أما التحول إلى الثيرابسيدات؛ فأفضَل ما يشاهد في أوروبا وروسيا، لكنّ مراحلَ هذا التحول

غيرُ معروفة جيداً حتى في هاتين المنطقتين بسببْ قلة الترسبات التي تحوي الأحافير في الزمن الحرج. ويمتدّ هذا الانقطاع في معرفتنا لسجل السينابسيدات الأحفوري ربما من 285 وحتى نحو 270 مليون سنة مضت. هذا وتخبرنا منطقتان رئيستان عن تاريخ هذه المجموعة هما: المنطقة الروسية حول جبال الأورال، ومنطقة كارو في جنوب إفريقيا؛ إذ يبدأ السجل في منطقة كارو ببعض الترسبات الجليدية التي يقدّر عمرها بـ270 مليون سنة، وبعدها يوجد سجلّ متواصل حتى الجوراسي؛ مما يقدم فهماً لا يضاهى لهذه السلالة الحيوانية.

انشطرت الثيرابسيدات إلى مجموعتين: مجموعة آكلات اللحوم بالدرجة الأولى، وأخرى عاشبة. وانحسر الجليد في جنوب إفريقيا منذ نحو 260 مليون سنة، ولكننا نستطيع الافتراضَ أنّ خط العرض المرتفع نسبياً لهذا الجزء من قارة بانغيا العملاقة (خط العرض60 درجة جنوباً) بقي بارداً. وكان لا يزال تركيز الأكسجين مرتفعاً وقتها، وبكلّ تأكيد أكثر ارتفاعاً من الآن، إلا أن ذلك كان يتغير؛ فتناقصت تراكيز الأكسجين مع تقدم العصر البرمي. وعلى ما يبدو، حدث تشعُّبان كبيران للأشكال ضمن كل من آكلات اللحوم والعواشب. وكانت الحيوانات السائدة من 270 إلى 260 مليون سنة مضت تقريباً هي الدينوسيفاليات Dinocephalian، وبلغت هذه الوحوش الضخمة أحجاماً مذهلةً، ليست كأحجام الديناصورات، لكنها تقترب بكل تأكيد من حجم أيّ حيوان ثدييّ باق حتى اليوم، ربما باستثناء الفيَلَة، ولابدّ أنّ بعضاً من أكبر الدينوسيفاليات كان وزنه يصل إلى وزن الفيل. وبلغ ارتفاع الموسخوبس *Moschops* على سبيل المثال، وهو جنس شائع ومشهور من إفريقيا الجنوبية، خمسةَ أمتار وكان له رأس ضخم وطرفان أماميان أطول من الخلفين، وكانت هذه الكائنات تصطادها مجموعة لواحم تماثلها حجماً.

وتعرضت الدينوسيفاليات وآكلات اللحوم المرافقة لانقراض عظيم منذ نحو 260 مليون سنة، ولا تزال أسباب ذلك الانقراض غير واضحة تماماً، وهناك القليل من البيانات حول توزيع كل من الدينوسيفاليات وخلفائها المباشرة في الهيمنة البرية، الديسينودونتات Dicynodonts الأوائل ومفترسيها. وسوف تظلّ هذه الحالة من عدم اليقين قائمةً حتى نحصل على أحافير جديدة من روسيا وجنوب إفريقيا، وللأسف لا يوجد إلا القليل من الأحافير من هذا الزمن، وعدد أقل من علماء الأحافير المنكبّين على دراستها؛ ولذلك فإننا لن نعلم الحقيقة لأجيال، هذا إذا افترضنا أن أجيال المستقبل ستواصل السعي إلى صيد الأحافير.



جمجمة غورغونوبسيات من ترسبات البرمي المتأخر، جنوب إفريقيا. (تصوير: بيتر وورد Peter Ward)

لقد شكّلت الديسينودونتات العواشبَ المسيطرة في الوقت الممتد من 260-250 مليون سنة مضت، والتي مُحيَت تقريباً عن وجه الكوكب في الانقراض البرمي الذي سنصفه بتفصيل أكبر في الفصل التالي، وكانت تصطادُها ثلاثُ مجموعات من آكلات اللحوم: الغورغونوبسيات Gorgonopsians التي فنيت في نهاية البرمي، والثيروسيفاليات Therocephalian التي كانت أكثر تنوعاً قليلاً، والسينودونت *Cynodonts* (كلبيات الأسنان) التي تطورت في النهاية إلى ثدييات خلال الترياسي.

حجم الحيوانات وتراكيز الأكسجين

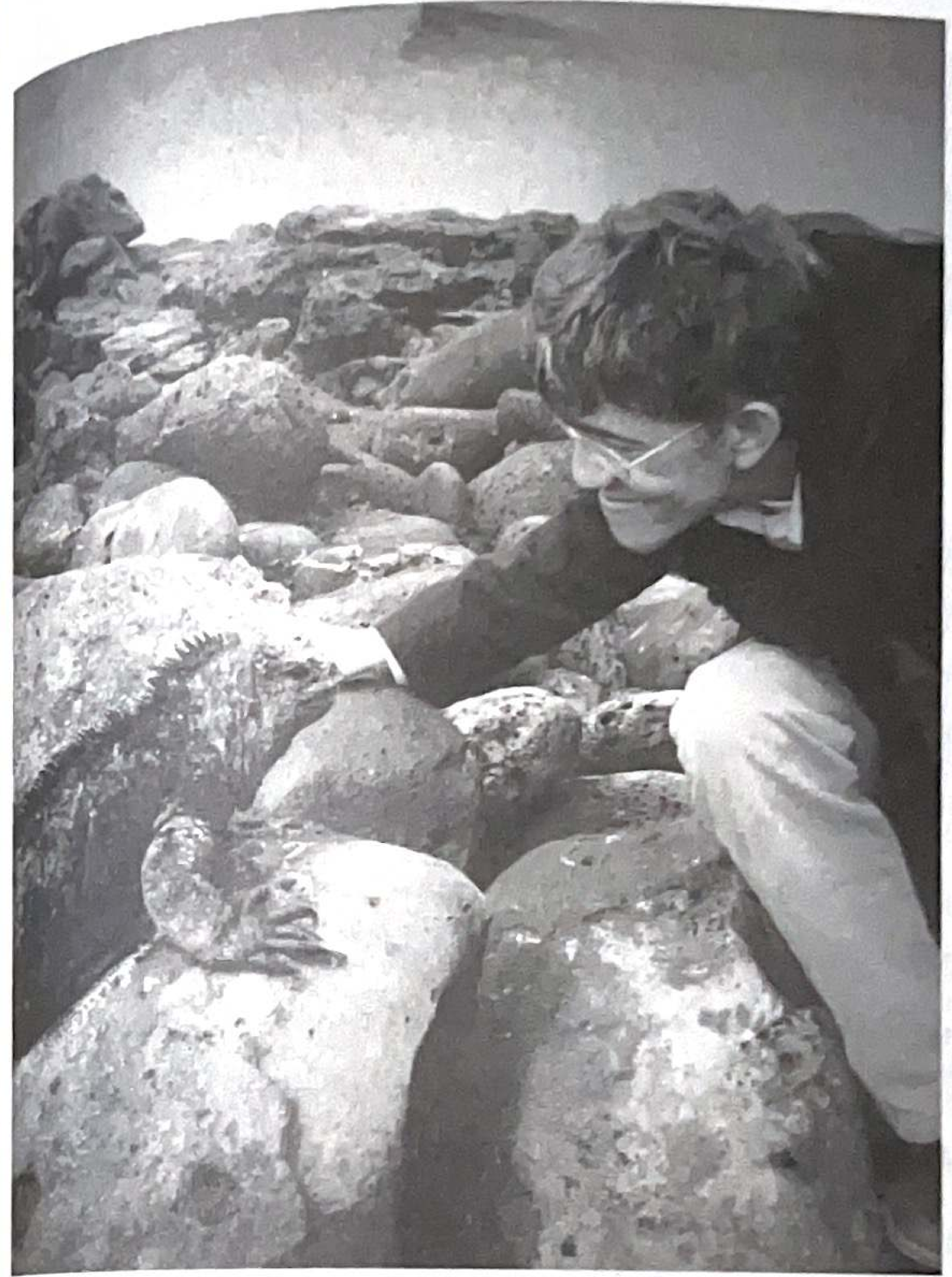
كان ارتفاع تركيز الأكسجين الجوي إلى قيم غير مسبوقة تتجاوز ثلاثين في المئة مصحوباً بتطور حشرات ذات حجم غير مسبوق أيضاً. إذ تعتبر اليعسوبيات العملاقة وغيرها من حشرات الكربوني المتأخر والبرمي الباكر أكبرَ الحشرات في تاريخ الأرض. وقد يكون ذلك مجرّد مصادفة، لكن أغلب المتخصصين يتفقون على أنّ الأكسجين المرتفع مكّن الحشرات من النمو إلى حجم كبير؛ لأنّ الجهاز التنفسي عند الحشرات يتطلب انتشارَ الأكسجين عبر الأنابيب إلى داخل جسم

الحشرة، وفي أوقات ارتفاع تركيز الأكسجين قد ينفذ المزيد من هذا الغاز الحيوي إلى أجسام حشرات أكبر حجماً. وإذا كانت الحشرات قد صارت أكبر حجماً عندما ارتفع تركيز الأكسجين، فماذا عن الفقاريات؟ تشير البيانات الحديثة إلى أن هذا ينطبق عليها أيضاً.

في عام 2006 قاس عالِمُ الأحافير ميشيل لوران Michel Laurin أطوالَ جماجم وأجسام مجموعة مختلفة من الزواحف الأُحفورة التي تعود إلى العصر الكربوني مروراً بالبرمي، منذ نحو 320 وحتى 250 مليون سنة مضت. فتبيّن أن كلا المقياسين يتبع تراكيز الأكسجين بدقة. فمثلما ارتفعت تراكيز الأكسجين في الكربوني المتأخر، فقد كَبُر حجم الزواحف، وعندما بدأ الأكسجين بالانخفاض في البرمي الأوسط أخذ الحجم بالتراجع. وقد أوضحت دراسة أجراها بول فالكوفسكي Paul Falkowski وزملاؤه على الثدييات في وقت لاحق (بكثير) ظاهرةً مشابهة جداً خلال الحقبة الحديثة الباكرة عندما ارتفعت تراكيز الأكسجين بشكل كبير، وفي الوقت نفسه ازداد متوسط حجم أنواع الثدييات أيضاً، وسنعود لذكرها في الفصل الذي يتناول ثدييات الحقبة الحديثة.

كما حدثت نزعة تغير الحجم هذه عند الزواحف الشبيهة بالثدييات قبيل انتهاء العصر البرمي. وتطورت الدينوسيفاليات، الثيرابسيدات الأكبر على الإطلاق، عند ذروة تركيز الأكسجين في البرمي الأوسط. وعندما بدأ تركيز الأكسجين بالانخفاض في البرمي الأوسط، أظهرت أصناف متعاقبة تنتمي إلى مجموعات مختلفة من الثيرابسيدات نزعةً نحو حجم جمجمة أصغر، وكان الديسينودونتات أهمها. أما بعض الأشكال الأكبر حجماً نسبياً التي بقيت تعيش في البرمي الأخير؛ فقد يتبادر إلى ذهننا جنس الديسينودون *Dicynodon* وحتى الغورغونوبسيات آكلة اللحوم، وفي هذا الوقت كان حجم العديد من الديسينودونتات أصغر. وكانت أصنافُ نهاية البرمي مثل السيستيسيفالاس *Cistecephalus* والدايدكتودون *Diictodon* وعدد قليل آخر صغيرةً جداً. كما أظهرت أبحاث أجريت في عام 2007 أنّ جنس الليستروصور *Lystrosaurus* الذي عاش في البرمي المتأخر وحتى الترياسي الباكر كان حجمه أصغر في الترياسي مقارنةً بالبرمي، وكذلك مجموعات السينودونتات المختلفة في البرمي المتأخر وحتى الترياسي الباكر كانت جميعها صغيرة الحجم، حيث بدأت تراكيز الأكسجين بالهبوط

الحاد. وتوجد استثناءات مثل بعض العمالقة في الترياسي والمعروفة بالكانيميريا *Kannemeyeria* والتريتيلودون *Tritylodon*، لكن بشكل عام فإن ثيرابسيدات الترياسي أصغر بكثير منها في البرمي. وأعدّ مؤخراً زميلنا (يعمل الآن في جامعة واشنطن) كريستيان سايدر Christian Sidor مقالاً أكّد فيه تراجعَ الحجم. وهكذا نرى أنه يوجد ترابط قويّ بين حجم الحيوانات البرية وتراكيز الأكسجين ابتداءً من البرمي الأخير وحتى الترياسي. فعندما تكون تراكيز الأكسجين مرتفعة، فإن رباعيات الأرجل تنمو لحجوم كبيرة، ثم تبدأ الحجوم بالصغر مع تناقص التراكيز.



أنتونيو لاسكانو Antonio Lazcano، متخصص بأصل الحياة ومهتم بالعلوم الإنسانية، في جزر غالاباغوس يتأمل أحد أشكال الحياة «الدنيا». (تصوير: بيتر وورد Peter Ward)

عصر الثدييات الأول

يحوي متحف بيبودي Peabody Museum الرائع في جامعة ييل واحدةً من أكبر مجموعات الأحافير في العالم، كما فيه أعظم رسومات علم الأحافير على الإطلاق.

توجد لوحتان جداريتان عملاقتان تزيّنان الجدار الضخم لمتحف بيبودي للتاريخ الطبيعي في حرم جامعة ييل. وبالنسبة إلى أجيال من الأمريكيين تعتبر هاتان الجداريتان أيقونتين تمثلان رحلةً عبر الزمن للحياة على اليابسة وهما: عصر الزواحف التي رسمت على مدار ثلاث سنوات (1943 -1947)، وعصر الثدييات التي رسمت على مدار ست سنوات (1961 -1967).

الجدارية الأولى، عصر الزواحف، تبدأ في المستنقعات المظلمة وتنتهي بانفجار البراكين الشاهقة فوق التيرانوصور ريكس. وتبدأ الجدارية الثانية أيضاً في الأدغال، لكنها تضمّ نباتات مختلفة جداً ومألوفة جداً. وهي تخبرنا بأنّ البرمائيات ولدت الزواحف التي ولدت الثدييات. أما وجهة نظرنا الآن؛ فسوف تتطلب جداريتين مختلفتين جدا لتصوير تجمّعات الفقاريات في عصور الماضي الغابر بشكل صحيح. وفي الواقع، نحن ندعم الفكرة القائلة بوجود ثلاثة «عصور» منفصلة للثدييات (علماً بأن كلمة «عصر» Age هنا ليست إلا وصفا وتصنيفاً غير رسمي، وغير موثّق علميا).

ويرجع العصر الأول للثدييات إلى العصر البرمي، ذروة الثيرابسيدات وأجدادها من السينابسيدات. ومن الناحية العملية، فهي لم تكن قد صارت ثدييات بعد، لكنها قريبة منها. وقد شكّلت تجمّعاً غنياً بالأنواع إلى جانب الوفرة العددية. فعاش في جنوب إفريقيا ما لا يقلّ عن خمسين جنساً في الوقت نفسه (وباعتبار الجنس الطبيعي يضم أنواعاً متعددة [إلى كثيرة]، فإن التنوع الفعلي على مستوى الأنواع كان أكثر من ذلك؛ ولربما وجد 150 نوعاً كتقدير متحفظ).

ولا تختلف جنوب إفريقيا اليوم كثيراً من ناحية خطوط العرض وربما حتى مناخياً عن جنوب إفريقيا في غوندوانا الجنوبية Gondwanaland منذ قرابة 255 مليون سنة. ويوجد اليوم 299 نوعاً؛ ويمكننا أن نتخيل مروجَ إفريقيا اليوم لكنها ممتلئة بالديسينودون بدلاً من العواشب الكبيرة، وبأنواع عديدة من آكلات اللحوم بدءاً من الغورغونوبسيات التي تعادل حجم الأسد إلى الثيريودونتات بحجم ابن

عرس، وتتغذى القطعان الهائلة ليس فقط بالعشب وإنما بالسراخس Glossopteris المنخفضة الكثيفة والأشنات. تلك هي إفريقيا في عصر الثدييات الأول.

أما العصر الثاني للثدييات؛ فيمكن اعتباره الوقت الممتد بين الترياسي المتأخر ونهاية الطباشيري: زمن الثدييات المكبلة، تحت سيطرة من قِبل الديناصورات الأسياد وهي تعيش في الشقوق الإيكولوجية Ecological cracks: في الليل، في الجحور، على الأشجار. أما حجمها لم يتجاوز حجم القط المنزلي، بل أصغر بكثير في العادة.

وأخيراً عصر الثدييات الثالث: أو عصر زالينجر Zallinger. فبعد الانقراض الطباشيري الثالث الجماعي أخذت الأنواع بالتدفق لتملأ العائلات التي نعرفها جيداً اليوم. وهذه هي القصة الأكثر وضوحاً بالنسبة إلينا: الناجون من غضب كويكب تشيكشولوب بدءاً من الحيوانات الشبيهة بالجرذان إلى العمالقة البائدة مثل التيتانوثيرات Titanotheres و اليوينثيرات Uintatheres (وحوش شبيهة بوحيد القرن) إلى مجموعات الثدييات التي نألفها اليوم.

ولم نعرف عصر الثدييات الأول حتى حلول عام 2000 تقريباً إلا من صحراء كارو في جنوب إفريقيا بشكل أساسي. ولكنْ، في القرن الحادي والعشرين اكتُشفت مجموعات جديدة كبيرة في شمال وسط إفريقيا على يد كريستيان سايدر Christian Sidor. كما نعرف الآن تجمّعات عملاقة أخرى في روسيا بفضل أعمال عالم الأحافير مايكل بينتون Michael Benton. وبقيت الثدييات صغيرةً جداً في عصرها الثاني غير أنها لم تهيمن إلا في عصر الباليوجين؛ فنالت في النهاية، وكأنها وريث عظيم لوقت طويل، «عصراً» سُمّي باسمها.

ونكاد نصدّق أن عصر الديناصورات بكامله كان غلطة كبيرة. فلو حدث تدفق بازلت ضخم واحد لاتخذ التاريخ مساراً مختلفاً تماماً؛ لكان الذكاء البشري موجوداً منذ 250 مليون سنة؟ فالأمر لم يستغرق طويلاً للانتقال من قردة إلى كائنات أكثر تقدماً منذ وقت ليس ببعيد.

12

الاندثار العظيم: نقص الأكسجين والركود العالمي: ما بين 252-250 مليون سنة مضت

قد تُخيِّبُ صحراء كارو في وسط جنوب إفريقيا أملَ الذين يزورونها لأول مرة. فعندما تجتمع كلمتا «إفريقيا» و«صحراء» في العبارة نفسها، تتبادر إلى الذهن غالباً صورةُ الصحراء الكبرى - المكان القاحل الأكثر شهرةً في إفريقيا - أو كالاهاري، وهي أرض قاحلة شاسعةٌ أخرى، مظاهرُ الحياة فيها قليلةٌ بسبب رمالها المتحركة وظروفها القاسية من حرارة لاهبة في النهار وبرودة قارسة في الليل. ولَمّا كانت الحيوانات والنباتات تعاني فتجدها قليلة الوفرة والتنوع، فلا عجبَ أن أعداد البشر فيهما محدود أيضاً، فمنتجاتها النباتية والحيوانية شحيحة.

وعلى خلاف الصحراء الكبرى وكالاهاري، لا توجد في صحراء كارو العظيمة كثبان رملية متحركة؛ فمعظمها صحراء صخرية ذات غطاء نباتي لا بأس به في الغالب، ويبدو أنه لا يوجد مكان على امتداد اتساعها لا يمكن للمرء أن يجد فيه روث الخراف؛ ما يدل على وجود هذه الأنواع المستقدَمة في كل مكان، إذ ليست هناك فيلة أو زرافات، ولا أفراس نهر أو تماسيح أو جواميس ماء أو وحيدو قرن؛ فهناك حياةٌ حيوانية في العديد من الأمكنة، وهي وفيرة في بعضها، إلا أنّ أنواعها لا تذكّرنا بإفريقيا. كما أن هناك أعداداً لا بأس بها من البشر في المزارع الكبيرة، ومن ثم فإن صحراء كارو ليست المكانَ المفضَّل للسياح الذين يعشقون الصحراء. ولكن، ما تنفرد به هذه الصحراء حقاً هو تراكمات من الصخور الرسوبية على مدى مئة مليون سنة ترسبت في الفترة الزمنية ما بين 270-175 مليون سنة مضت.

وبتموضع ضمن هذا الركامِ الصخري الواسع السجلُ الأفضل في العالم للحياة الحيوانية الأرضية الكبيرة، متضمّنةً الحيوانات التي عاشت قبل وبعد الانقراض الأكثر أهمية بين كل الانقراضات الجماعية، وهو الانقراض الجماعي البرمي الترياسي. فقد قامت أجيال من علماء الأحافير، ابتداءً من أواسط القرن التاسع عشر، بالبحث في مجاري الأنهار وأرضيات الوديان النهرية القديمة التي أنشأتها طبقات صحراء كارو ونشأت فيها. إذ غالباً ما تُحمَل الحيوانات بعد موتها إلى مجاري الأنهار أو في برك

مائية، حيث يمكن أن تكون قد تعرّضت للهجوم منذ وقت طويل مضى؛ فتساقط عظامها في الطين وتُحفظ فيه. وبقيت هذه المنطقة السجلّ الرئيس لتلك المدة حتى وقت قريب. ومؤخراً أُنجزت أعمال جديدة في شرق روسيا من قبل زميلنا مايك بينتون Mike Benton من جامعة بريستول Bristol، وفي شمال وسط إفريقيا في بلاد النيجر من قبل زميل آخر لنا هو كريستيان سايدر Christian Sidor من جامعة واشنطن، حيث اكتشفا سجلات جديدة مهمة.[1] ومع ذلك، حتى هذه المناطق الجديدة لا تضاهي الثراء ودقة التمييز الزمني الذي تَهبه لنا صخور كارو - إن صحّ استخدام كلمة «تهبه» في هذا السياق. ففي الواقع، فلم تكشف صحراء كارو إلا مُكرَهةً عن مخزونها الواسع من المعلومات المتعلقة بواحد من أكثر الأوقات الحرجة في تاريخ الحياة على الأرض، وكان لا بدّ من الحصول عليه. وبينما قد يبدو ذلك العمل ممتعاً (فمن لا يحلم أن يكون عالمَ أحافير يسعى إلى اكتشاف جماجم مرعبة للوحوش المفترسة القديمة مثل تيرانوصور ريكس)، لكنه بالنسبة إلى غشائه عملٌ شاقّ على أقل تقدير.

وتستغرق رحلةٌ بالسيارة من كيب تاون Cape Town إلى قلب صحراء كارو يوماً كاملاً. غير أنه لما كانت الصخورُ ذات انحدار خفيف، والارتفاع يتزايد شيئاً فشيئاً في أثناء السفر نحو الشمال والشرق إلى داخل كارو، فإنه يمكن قراءة كامل كتاب طبقات الأرض التي تحويها كارو من غلافه العتيق العائد للعصر البرمي الأوسط إلى فصله النهائي الحاوي على الديناصورات والعائد للعصر الجوراسي. وليس الوقت فقط هو الذي يتغير عند الصعود عبر آلاف الأقدام الإجمالية التي تمثل سجل كارو الرسوبي. فالمرء يبدأ من وقت الجليد والجبال الجليدية لينتهي فيما كان من أحرّ الأوقات في تاريخ الأرض، إضافة إلى المرور عبر فترة زمنية طولها عشرات الملايين من السنين حينما تناقص الأكسجين الجوي حتى بلغ أدنى تركيز له منذ الظهور الأول للحيوانات بالمطلق، منذ نحو 600 مليون سنة. ومع أنه يمكن فهم كثير من قراءة هذا السجل برمّته، فإنه توجد صخورٌ تعود إلى فترة زمنية تمثّل وقتاً تمّت دراسته أكثر من أيّ وقت غيره.

إنها عدة مئات من الأمتار العائدة للطبقات المتموضعة بين 252 و248 مليون سنة أي الصخور التي تموضعت في الألفيات الأخيرة من العصر البرمي (ومن ثمّ من الحقبة الأولية التي تنتهي مع نهاية البرمي)، وبضعة ملايين من السنين الأولى التالية للانقراض الجماعي الكبير قبل 252 مليون سنة.

لقد كان علماء الجيولوجيا، على مدى عقود من الآن، يطرحون عدة أسئلة جوهرية حول هذه الصخور وجماجمها وهياكلها العظمية التي، مع أنها نادرة، ظلت محفوظة بإتقان. فالسؤال الأول هو المدة الزمنية التي استغرقها الانقراض الجماعي، إذ تخطت سرعة الانقراض منذ بدايته معدلَ السرعة الطبيعية والمقدرة بنحو انقراض واحد كل خمس سنوات. ثانياً، نريد معرفة ما إذا حدث الانقراض الكارثي على اليابسة بالتزامن مع الانقراض الجماعي البرمي في البحار. أما السؤال الثالث، وهو ربما الأكثر إثارةً للاهتمام: فهو سبب الانقراض الجماعي. وأخيراً، إنه لمن المهم اكتشاف سرعة «تعافي» النظم الإيكولوجية البرية، إذ يمكن أن نحصل من هذه الأدلة على معلومات مفيدة حول كيفية النجاة من أيّ انقراض جماعي مستقبلي شبيه بالانقراض البرمي، وهو محتمل أكثر بكثير مما يدركه أبناء نوعنا.

وبإعادة صياغة ما قاله واحدٌ من أعظم علماء الأحافير في القرن العشرين، ديفيد روب David Raup، من جامعة شيكاغو: «هل كانت الأنواع الناجية صاحبة جينات جيدة أم ببساطة صاحبة حظ جيد؟»

نتائج الانقراض البرمي

وبينما يدور جدالٌ حادٌّ حول سبب أو أسباب الانقراض البرمي، فإن الجميع يتفق على جانب واحد من تلك الفترة الزمنية، وهو أن النُّظم الإيكولوجية بعد الانقراض كانت قد تأثرت بشكل بالغ، وطال تعافيها. ويُميِّز هذا الدليل الأخير بسهولة الانقراضَ البرمي عن الحدث الطباشيري الثالثي اللاحق؛ فمع أنّ كلا الانقراضين سبّب اختفاءَ أكثر من نصف الأنواع على كوكب الأرض، فقد كان التعافي سريعاً نسبياً بعد حدث "K-T" (الانقراض الطباشيري الثالثي الجماعي)، وربما يعود ذلك إلى اختلاف أسبابهما. فقد تقبّل العلماء منذ أكثر من عقد فكرة اصطدام كويكب بالأرض والدمار البيئي الناتج منه مسبباً لحدث "K-T"، لكنْ سرعان ما تبددت الظروف القاتلة التي أعقبت الاصطدام، بخلاف الأوضاع بعد الحدث البرمي. وكما رأينا سابقا، بينما يعتقد بعض علماء الأرض أنّ اصطدام أجسام كبيرة بكوكب الأرض هو السبب في الحدث البرمي وحدث "K-T"، يبدو أنّ الظروف البيئية المُحدِثة للانقراض البرمي استمرت ملايين السنين بعد بدء الانقراض، ولا يشاهد أي شيء يشبه علامات التعافي حتى أواسط الترياسي قبل نحو 245 مليون سنة.

يمكن توقع هذه النتائج إذا كان قسمٌ ما من الانقراض الجماعي في البرمي قد نجم بشكل مباشر أو غير مباشر عن تناقص الأكسجين في نهاية البرمي. وتُبَيّن أحْدَثُ منحنيات بيرنر أن الأكسجين بقي منخفضاً في الترياسي أيضاً، كما كانت هناك بعض المؤشرات على أن تراكيز الأكسجين لم تصل إلى حضيضها ولم تبدأ بالارتفاع إلا قبيل نهاية الترياسي الأدنى، وهذا يمكن أن يفسر تأخر التعافي كل هذا الوقت. ويشير هذا الدليل إلى استمرار الأحداث البيئية المسببة للانقراضات. وإذا كان ذلك صحيحاً، وبافتراض أن الحيوانات قادرة أساساً على التكيف مع هذه الظروف الضارة؛ لكانت هناك تكهّنات بأنّ الترياسي سيتمخض عن حشد من الأنواع الجديدة، ليس فقط استجابةً للجيوب الإيكولوجية Ecological niches العديدة الفارغة الناتجة بفعل الانقراض الجماعي، بل يمكنه أيضاً أن يُرينا أنواعاً جديدة تبرز رداً على التأثيرات البيئية الأطول أمداً لحدث الانقراض المُطَوَّل بحد ذاته. وهذا هو النمط الملاحَظ خلال الترياسي؛ إذ امتلأ العالم ثانيةً بأنواع تبدو مماثلةً للأنواع الآخذة بالانقراض بالشكل والسلوك (أي عملية استبدال إيكولوجي)، فقد ظهرت أيضاً لأول مرة حشود من مخلوقات جديدة لا سيما على اليابسة. وسوف نُسلّم في الفصل المقبل بأن العديد من هذه الأنواع الأخيرة قد تطوّر ليُجابه حالة الأكسجين المنخفض المستمرة التي بدأت قرب نهاية الترياسي، وواصلت هذه الأنواع بقاءها تماماً حتى الجوراسي، لمدة فاقت خمسين مليون سنة. فقد كان الترياسي حقاً مفترق طرق للحيوانات التي تكيفت مع عالَمين مختلفين: أحدهما منخفض الأكسجين، والآخر أكثر ارتفاعاً.

الجدال: الاصطدام مقابل الدفيئة

مع نهاية القرن العشرين ومطلع القرن الحادي والعشرين، كان الانقراض البرمي يحظى باهتمام متزايد، وذلك بالدرجة الأولى لأنه كان الأكثر سوءاً على الإطلاق، إذ يشير التقدير الحالي الذي كثيراً ما يُستَشهد به إلى اختفاء تسعين في المئة من مجمل الأنواع. أما سرعة العملية التي تشكل مفتاح السؤال عن كيفيتها؛ فقد بدأت تُدرَك بالشكل الأمثل بفضل جهود علماء الأحافير من الصين والولايات المتحدة المشاركين في دراسات مستفيضة أجريت على الصخور الكلسية (الجير) السميكة العائدة للعصرين البرمي والترياسي، والتي برزت قرب ميشان Meishan في الصين.[2] وعمل علماء الجيولوجيا على وضع رسم بياني للسماكة والتطابق النسبي لكل طبقة رسوبية، ثم جُمِعَت الأحافير من الطبقات التي قِيسَت بدقة

شديدة. كما حدّد علماء الأحافير موقع كل أحفورة بعناية مع تسجيل الطبقة التي اكتشفت فيها. واستخدم علماء الأحافير منهج تشارلز مارشال Charles Marshall الإحصائي الجديد المعروف بمنهج فترات الثقة Confidence interval methodology،[3] والتي سمحت بتخمين المجال الزمني النهائي الذي تُصادِف ضمنه أي أحفورة محددة. هذا، وكانت لعلماء الجيولوجيا في الصين مزايا كبيرة، حيث وُجدت في الصين طبقات متناثرة من الرماد أمكن تاريخها باستخدام أجهزة عالية الحساسية تقيس نسب اليورانيوم إلى الرصاص، ومؤخراً طبّق سام بورينغ Sam Bowring من معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا MIT's هذه المنهجية على العينات.[4] وقد حدد العملُ الأحدث لهذه المجموعة زمنَ الانقراض بما لا يزيد على ستين ألف سنة، وهي دقة مذهلة بالنسبة إلى صخور يُقدّر عمرها بربع بليون سنة.

كما جمعت هذه المساعي نتائج مأخوذة من خمسة مقاطع طبقية مختلفة من موقع ميشان مع أخذ عينات من كل 30-50 سم، حيث وُجد في هذه الصخور في النهاية 333 نوعاً بالمجمل من الحياة البحرية العائدة إلى كائنات بحرية متنوعة كالمرجان والأصداف عضدية الأرجل ذوات المصراعين، والحلزونات ورأسيات الأرجل وثلاثيات الفصوص وآخرين؛ فما من مكان في أيّ أفق طبقي وأيٍّ وقت حظي بجهد تجميعي وثراء حيواني تمّ توثيقه كاملاً بدقة كهذه.

تحوي الشروط البيئية البحرية المختلفة في نهاية البرمي أدلةً واسعة الانتشار تدلّ على نقص الأكسجين في المحيطات، أو على أكسجة منخفضة في كلّ من الطبقات البحرية السطحية والعميقة. وتمت دراسة ذلك في بحث لامع في عام 1996 أجراه يوكيو إيسوزاكي Yukio Isozaki، من جامعة طوكيو، والذي حدّد المواقع الحدودية في الطفول الصوانية المتموضعة عميقاً في البحر والتي كانت قد دُفعت على سطح الأراضي اليابانية. وقرابة الانقراض الجماعي تحديداً، تحولت الطفول الصوانية الحمراء عادة إلى اللون الأسود الداكن مع موت كل شيء. ويبدو أنّ نقص الأكسجين كان شديدا لدرجة أنه أدى إلى القضاء الفوري على كائنات بحرية عديدة، كما هي الحال اليوم في ظاهرة المد الأحمر. وإضافة إلى ذلك، توجد أدلة على حدوث احترار عالمي تصادف مع اندفاعات اللافا (الحمم البركانية) السيبيرية في وقت الانقراض الجماعي.

لقد اشتُبه بالعديد من العوامل بوصفها سبباً لهذا الانقراض، الأولُ هو احتمال أنّ بازلت الفيضانات السيبيرية أطلق كميات هائلة من الغازات في الغلاف الجوي؛ فأطلق حدوثَ تغيّر

المناخ على نطاق واسع وأمطاراً حمضية وفقاً لافتراضات بول رين Paul Renne وآخرين من المتخصصين بتأريخ الأرض في بيركلي. إذ صار الإطلاق المفاجئ للميثان، مرشّحاً معقولاً لكونه القاتل حسب معلومات جديدة من مصادر متباينة. وعلى الرغم من غياب الأدلة التي تدعم نظرية الاصطدام، فإن هذه الفرضية (بوصفها سبب الانقراض) ظلت ماثلةً في أذهان الجميع. وحاولت الأدلة الجديدة من الصين تقديم برهان على حدوث شكل من أشكال «الضربة المفاجئة». ومن بين كل الأسباب المحتمَلة للانقراض الجماعي يُعتقد أنّ اصطدام كويكب هو الوحيد القادر على إحداث موت جماعيّ كهذا خلال مثل هذا الوقت القصير.

وبحلول بداية القرن الحالي، فُتِن مؤرخو الأرض باصطدام جسم ضخم خارج أرضي بوصفه سبباً لمعظم الانقراضات الجماعية إن لم يكن كلّها. ففي عام 2000 بدا لنا الانقراض البرميّ مختلفا عن أي شيء نعرفه: إذ كان لا يزال مشتبَهاً بكونه ناتجاً من اصطدام، من قبل مجتمع الجيولوجيين، مع الاعتراف باختلافه عن حدث K-T القاتل للديناصورات الذي كان سبقاً صحفياً في عام 1980. ولربما سببت عدةٌ اصطداماتِ الانقراضَ البرميَّ، أو اصطدامٍ واحدٍ كبيرٍ إلى جانب آلية انقراض من نوع آخر. إلا أنّ اللغز الأكبر هو أن أحداً من الباحثين المشاركين في فحص صخور الصين (في أواخر القرن العشرين ومطلع الحادي والعشرين) لم يجد أياً من الأدلة المشهورة المتعلقة بالانقراض الاصطدامي الذي انتهى عنده العصر الطباشيري، والتي دُرست جيداً في العديد من المواقع الحدودية لحدث K-T ومنها: الإيريديوم، والكريات الزجاجية، وحبيبات الكوارتز المروع.

وفي عام 2001 والسنوات القليلة اللاحقة، بلّغ فريقٌ بقيادة الجيوكيميائية لوان بيكر Luann Becker[5] عن اكتشاف تراكيز عالية من جزيئات الكربون المعقّدة المعطاة اسماً سخيفاً هو "بوكمينسترفوليرين" Buckminsterfullerenes واختُصر رأفةً بنا إلى مركّبات كرات بوكي Buckyballs، وقد استعملوا هذه الأدلة ليقدموا برهاناً على أنّ الانقراض البرمي، على غرار الانقراض الجماعي في نهاية الطباشيري، كان ناتجاً من تصادم الأرض بكويكب ضخم ضربها قبل 251 مليون سنة.

تشكّل كرات بوكي الموصوفة من قِبل هذا الفريق جزيئات كبيرة تحوي على ستين ذرة من الكربون على الأقل؛ لأن بنيتها تشبه كرة القدم أو القبة الجيوديسية، فقد سُمّيت نسبة إلى المهندس المعماري بوكمينستر فولر Buckminster Fuller مبتكر القبة الجيوديسية. ويقوم الافتراض على أساس أنّ جزيئات الكربون الشبيهة بالقبة الجيوديسية حبست غازيّ

الهليوم والأرغون داخل بنيتها قفصية الشكل، واكتشفت هذه المؤشرات الجديدة على الاصطدام في طبقات نهاية العصر البرمي في ثلاثة مواقع جغرافية مختلفة متناثرة حول العالم. وفسّر فريق بيكر وزملائها أنّ كرات بوكي هذه من منشأ خارج أرضي، ومن ثمّ فهي مماثلة للإيريديوم (الذي تجدر الإشارة إلى أنه لم يتمّ العثور عليه)؛ لأنّ الغازات النبيلة المحتجَزة في الداخل تتصف بنسبة غير اعتيادية من النظائر. فعلى سبيل المثال، الهليوم الأرضي في معظمه هو هليوم 4- ويحوي فقط كمية صغيرة من الهليوم 3-، فيما الهليوم خارج الأرضي وهو النوع الموجود في هذه الفوليرينات هو في معظمه هليوم3-. وبحسب المؤلفين، فإنه من الممكن أن تكون كل هذه "الأشياء النجمية" قد أُحضرت لكوكب الأرض فقط بواسطة مذنب اصطدم بالأرض في نهاية البرمي (والأصح أنه أنهى العصر البرمي).

لقد أعلن الباحثون أنّ قطر المذنب أو الكويكب كان 6-12 كيلومتراً، أي تقريباً بحجم كويكب K-T الذي خلّف وراءه فوهة تشيكشولوب قُرب ما ندعوها اليوم مدينة بروغريسو في شبه جزيرة يوكاتان بالمكسيك قبل 65 مليون سنة مضت، لكن التصادم بمثل هذا الجسم الضخم في البرمي يفترض أن يكون قد ترك فوهة هائلة كما حدث نتيجة اصطدام تشيكشولوب اللاحق. وبناءً على ذلك، بدأ فريق بيكر بحثاً جاداً عن أي فوهة اصطدام مدفونة أو لم يُنتبَه إليها.

وبعد ذلك بسنتين في 2003، أعلنوا أنهم اكتشفوا فوهة عملاقة مدفونة في قاع البحر خارج أستراليا.[6] وبدت قضية «السبب الاصطدامي» للانقراض البرمي منتهية. وبرزت مشكلات لاحقة تتعلق بتفسيرات كلّ من كرات بوكي ومدى احتمال أن تلك البنية الضخمة تحت الماء المسماة فوهة بيدو Bedout crater هي فوهة اصطدامية أساساً.

ومن صفات العلم تكرار النتائج والقدرة على التكهن (من بين مجموعة أخرى من الأمور)، وانهارت فرضية كرات بوكي حول الانقراض البرمي نهائياً من كلا هذين الجانبين (ومع ذلك، العجيب أن الاصطدام وكرات بوكي لا يزالان أول نتيجة يعطيها غوغل عند البحث عن عبارة «الانقراض البرمي» في عام 2012). إلا أننا - نحن الباحثين عن أسباب هذا الانقراض الجماعي - كُنّا من المشككين منذ البداية، وكنا على يقين أن تلك الفرضية لا يمكن أن تكون صحيحة.

لقد استندت دراسة بيكر وزملائها Becker *et al* الأصلية إلى عينات من الصين واليابان وأماكن أخرى. فالأعمال اللاحقة لم تعطِ نتائج متوافقة مع دراسة الأحافير من الصين، وبيّن

صديقنا يوكيو إيسوزاكي قبل عدة سنوات من ذلك أن المجال الحدودي الحاسم الذي قامت بيكر باعتيانه قرب أوساكا Osaka في اليابان كان قد أزيل في الواقع بسبب صدع منخفض الزاوية في المجال الحدودي تماماً- حيث فُقدت ثلاث مناطق كاملة تعود لمخروطيات الأسنان Conodont على جانبي الحدود. كما أنهم ذكروا وجود الشذوذ في نظير الهليوم 3- تماماً حيثما قيل لهم (على نحو خطأ) إنّ الحدود ينبغي أن تكون. وقد كان شيءٌ ما باعثاً على الشك، وفي نهاية المطاف برهن زملاؤنا في معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا على أنّ نظير الهليوم 3- يتسرب خارج أقفاص الفوليرين في أقل من مليون سنة، ومن ثمّ يجب ألا يبقى أي أثر منه بعد 252 مليون سنة. وإضافة إلى ذلك، تبيّن أنّ البنية العميقة التي فُسّرت بكونها الفوهة الباعثة على نشوء كرات بوكي ونظير الهليوم 3- وموت الكائنات الحية في العالم هي موضعٌ كبير لصخور بركانية لا تمتّ بصلة لأيّ نوع من آثار ضربة كويكب أو مذنب.

وشكلت مجموعة من علماء الجيولوجيا وعلماء الكيمياء العضوية فريقاً واستخدموا أداة جديدة نوعاً ما لفحص الطبقات البحرية في أواخر البرمي وبداية الترياسي. وبدلاً من البحث عن أحافير الأجساد استخرجوا بقايا عضوية من الطبقات[7] بحثاً عن الأحافير الكيميائية التي تُسمّى في حال وجودها واسمات حيوية Biomarkers. والواسمةُ الحيوية المكتَشفة لا يمكن أن يكون مصدرها إلا من أنواع البكتيريا الأرجوانية التي تقوم بالبناء الضوئي، ولا تعيش إلا في المياه الضحلة الخالية من الأكسجين والمشبعة بكبريتيد الهيدروجين السام. ويبدو أنّ كتلةً حيوية ضخمة من الميكروبات المنتِجة لكبريتيد الهيدروجين ملأت المحيطات - وليس فقط مساحةً صغيرة كالبحر الأسود اليوم وإنما معظم محيطات العالم إن لم يكن كلها - بناءً على دراسات أحدث أجراها فريق المعهد *MIT* الذي اكتشف في عام 2009 الواسمةَ الحيويةَ نفسها في أكثر من عشرة مواقع منتشرة في الكرة الأرضية والتي تعود إلى أواخر العصر البرمي.[8]

وفي عام 2005 اقترح فريقٌ من الجيوكيميائيين من جامعة ولاية بنسيلفانيا بقيادة لي كمب Lee Kump، وهو واحد من الخبراء الأوائل في العالم المتخصصين بكيمياء المحيطات، ولا سيما دورة الكربون فيها، مع زميله القديم مايك آرثر Mike Arthur (أيضاً من جامعة ولاية بنسيلفانيا) حلاً محتمَلاً للسببِ الغامض الكامن وراء الانقراض الجماعي الأعظم على الإطلاق، فقد أشار مقالهم إلى أنّ كبريتيد الهيدروجين الموجود في نهاية البرمي الذي أُنتج في البحر بواسطة ميكروبات (ليصحّ القول هي أنواع تختلف عن البكتيريا الأرجوانية الكبريتية)، قد شارك بشكل مباشر في الانقراض البحري والبري.[9]

فرضية كمب- بزوغ نظرية الانقراض بالدفيئة

هذا هو سيناريو دراسة كمب وزملائه: إذا تجاوزت تراكيز كبريتيد الهيدروجين في المياه العميقة عتبةً حرجة خلال أوقات نقص الأكسجين في المحيطات (أي الأوقات التي يفقد فيها قاع المحيط وربما حتى سطحه الأكسجين)، فإن الشروط التي تفصل المياه العميقة الغنية بالكبريت عن المياه السطحية المؤكسَجة في المحيطات (مثل تلك السائدة في البحر الأسود اليوم)، قد ترتفعُ فجأة إلى سطح المحيط، ومن ثمّ ستكون النتيجة المهولة ارتفاع فقاعات من غاز كبريتيد الهيدروجين شديد السمية إلى الغلاف الجوي. ويزوّدنا هذا المدخل الجديد إلى الاندثار على نطاقِ الكوكب بصلة تربط الانقراضات في البحار بالانقراضات على البر؛ لأن كبريتيد الهيدروجين يتراكم في طبقة التروبوسفير من الغلاف الجوي ليبلغَ تراكيز قاتلة للنباتات والحيوانات، حتى وإن كان تدفقه من المحيط متواضعاً نسبياً. ولا تقتصر هذه الفرضية على نهاية البرمي، بل يحتمل أن يكون قد حدث أيضاً في أوقات أخرى من تاريخ الأرض، ومن ثمّ فإنه لربما شكّل اضطراباً مهيمناً مسبباً للانقراضات الجماعية.[10]

قام كمب وفريقه بحسابات تقريبية، وأذهلهم استنتاج أن كمية غاز كبريتيد الهيدروجين التي دخلت الغلاف الجوي في البرمي ستكون أكبر بأكثر من ألفي مرة من التدفق المعاصر (وهو الغاز القاتل السام الذي ينطلق من البراكين)، ولابدّ أنّ كمية كافية منه دخلت الغلاف الجوي لتؤدي في الغالب إلى تراكيز سامة.

وإضافة إلى ذلك، يحتمل أن درع الأوزون قد تبدّدت، وهي طبقة واقية للحياة من المستويات الخطيرة للأشعة فوق البنفسجية. وبالفعل، توجد أدلة على حصول ذلك في نهاية البرمي، حيث تُظهر أحافير الأبواغ من مجال الانقراض في رواسب غرينلاند أدلةً على طفرات يحتمل أنها وقعت جرّاء التعرض المديد لدفقات الأشعة فوق البنفسجية المرافقة لفقد طبقة الأوزون.

ونرى حاليا أن الكتلة الحيوية للعوالق النباتية الواقعة تحت ثقب الأوزون في الغلاف الجوي فوق أنتاركتيكا (القارة القطبية الجنوبية)، تتراجع بسرعة، فإذا دُمِّرت قاعدة السلسلة الغذائية فلن يمضي وقتٌ طويل قبل أن تتأذى الكائنات الحية الأعلى منها، حتى إنه ذُكر أنّ الخسارة الكاملة لطبقة الأوزون هي طريقة لحدوث انقراض جماعي إذا ضُربت الأرض بجسيمات من انفجار سوبرنوفا (نجم مستعر) قريب؛ ما

يمكن أيضاً أن يؤدي إلى تدمير طبقة الأوزون. وأخيراً فإن الزيادة المفاجئة في تراكيز الميثان تُضخّم بشكل مهم احترار ظاهرة الدفيئة المرافقة لتراكم ثاني أكسيد الكربون، وتراكيز الميثان التي ستكون قد ارتفعت لأكثر من مئة جزء في المليون. وبينما يتزايد كبريتيد الهيدروجين في الغلاف الجوي مدمراً طبقة الأوزون، فإن غازات الدفيئة بدورها تقوم بزيادة حرارة كوكبنا. حيث تبيَّن أنَّ قدرة كبريتيد الهيدروجين على القتل تزداد بالحرارة. ومن ثمَّ تمَّ تقديم بديل جديد ومقنع لفرضية الاصطدام. ويحتمل أن تكون الانقراضات متواصلة مدة طويلة أو على دفعات، أي تتابعات من الأحداث قصيرة الأمد تقتل كل مرة على حدة.

اطلعنا حتى الآن على الأدلة من الصخور بحدّ ذاتها لكن هناك طريقة أخرى للكشف عن أحداث الماضي، وهي استخدام بعض هذه البيانات في نمذجة ما كانت عليه الأغلفة الجوية في الماضي. وهناك العديد من هذه النماذج، وكثير منها قد يفيد في محاولة التكهن بما قد يكون عليه الغلاف الجوي للأرض ومستويات الحرارة مستقبلاً. وقد تمّت نمذجة تراكيز الأكسجين وثاني أكسيد الكربون إضافة إلى درجات حرارة العالم المتوقَّعة فيما يتعلق بالعصر البرمي. فأولاً، حسب بوب بيرنر Bob Berner من جامعة ييل، التغيرات في تراكيز الأكسجين وثاني أكسيد الكربون في الجو، والذي اكتشف مع آخرين أنه لابدّ من وجود ذروة واضحة لتراكيز ثاني أكسيد الكربون مترافقة مع تراكيز غائرة للأكسجين في نهاية البرمي. ثانياً أخذ فريق كمب على عاتقه المهمةَ الصعبة لفحص الاضطرابات المحتملة في انبعاث كبريتيد الهيدروجين حول العالم، مستخدمين لإنجاز ذلك النموذج GCM (نموذج الدوران العالمي).

لقد طُوِّرت هذه النماذج في الأصل لفهم المناخ الحالي ونماذج المناخ في أيامنا، ولكن لما كانت مواضع القارات ودرجات الحرارة وتراكيز الأكسجين وثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي وفي المحيطات معروفةً في نهاية البرمي وخلال الترياسي، فإنه يمكن تطبيق هذه الطريقة على البرمي. واستنبط كمب وفريقه منطقياً أن العنصر الحاسم الذي يجب اقتفاؤه هو الفوسفور، وهو مكوِّن أولي في السماد النباتي. وإذا لُوحظ ارتفاع سريع في تراكيز الفوسفور في المحيطات في نهاية البرمي، فإنه يمكننا كذلك حساب كمية كبريتيد الهيدروجين الناتجة من المستفيدين من ارتفاع تراكيز الفوسفور، وهي الميكروبات الكبريتية.

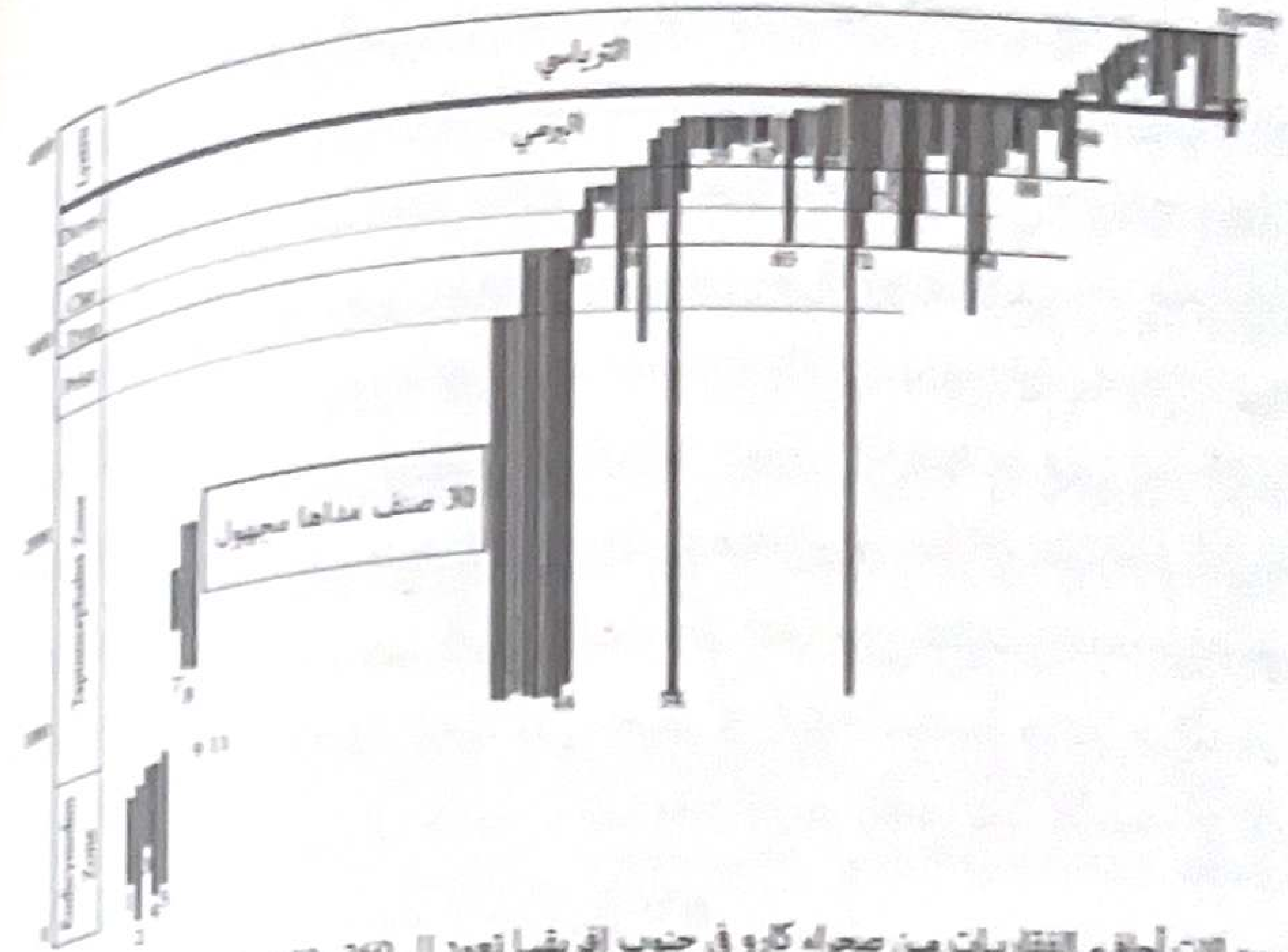
إن انطلاق كبريتيد الهيدروجين لم يحدث مرة واحدة فقط بل مراراً على هيئة سلسلة اندفاعات تجمعت في الوقت الذي كانت تترسب فيه الطبقات الحدودية الفاصلة بين البرمي والترياسي حول العالم. وختم كمب عمله بنبرة قاتمة جداً: النموذج لم يبيّن فقط المواقع التي انبعث منها كبريتيد الهيدروجين من البحر إلى الهواء، بل قدّم أيضاً في عام 2005 حسابات جديدة تتوافق تماماً مع تقديراته السابقة حول كمية كبريتيد الهيدروجين الإجمالية التي انطلقت إلى الغلاف الجوي. أما النتائج؛ فهي: لقد كانت هناك تراكيز أكثر من كافية للقضاء على معظم الحياة البرية، ولما كان هذا الغاز الكريه يذوب في ماء البحر أيضاً، فهو كفيل بالقضاء على الحياة في الطبقات السطحية منه، ولاسيما بالنسبة إلى الكائنات الحية التي تعيش في المياه السطحية وتنتج هياكل من كربونات الكالسيوم كالمرجان والمحار وعضديات الأرجل والحيوانات الأشنية، أي كل اللافقاريات التي وقعت ضحية الانقراض الأعظم.

ومنذ نَشْر تفسير كمب وزملائه قام آخرون، ومن ضمنهم توم ألجيو Tom Algeo من جامعة سينسيناتي، بتحسين فهمنا للجوانب الكيميائية لهذا الانقراض الجماعي بالتحديد، وذلك في مراجع متعددة.[11]

الانضغاط الارتفاعي

إن دراسة الانقراضات الجماعية الماضية قديمةُ العهد، فهي في الواقع من الأبحاث الأولى التي يمكننا حقاً أن ندعوها «علماً»، منذ نشأة علم الجيولوجيا بوصفه فرعاً جديداً من المعرفة في السنوات الأولى من القرن التاسع عشر. أما الجديد في فهمنا للموضوع؛ فهو إدراكنا لدور الميكروبات في تسبيب واحد أو أكثر مما يُسمَّى الانقراضات الجماعية الخمسة الكبرى في دهر البشائر.

ومع أن الانقراضات بحد ذاتها ليست موضوعاً جديداً، فإن الجانب المقابل من العملة، أي ما بعد الانقراض الجماعي، برز في العقد الأخير ميداناً فرعياً جديداً ورئيساً في البيولوجيا التطورية وعلم الأحياء القديمة على حدّ سواء. فقد عرفنا أنه كلما كان الانقراض الجماعي مدمراً أكثر، كان العالم الذي يأتي بعده مختلفاً أكثر؛ وذلك ليس فقط في الفترة الزمنية التي تليه مباشرة، أي خلال أول بضع مئات الآلاف إلى ملايين السنين اللاحقة، بل خلال عشرات الملايين من السنين التي تليها، بالنسبة إلى بعض السلالات البيولوجية إلى الأبد.



مجالات أحافير الفقاريات من صحراء كارو في جنوب إفريقيا تعود إلى 260 -250 مليون سنة تقريباً ويمثل كل خط عمودي جنساً من الفقاريات (بناءً على الأحافير المستردّة من طبقات الأرض). وبينما حدثت الانقراضات في مجال زمني ضيق نوعاً ما، فلا يشبه هذا النموذج ما نراه في نهاية الطباشيري، إذ أظهر "المتد" للانقراضات الظاهرة هنا يميز «الانقراضات الجماعية بالدفيئة»، أي ليس مستوى واحداً من الانقراض وإنما انقراضات متعاقبة.

ومن الجوانب غير المدروسة سابقاً لتغير تراكيز الأكسجين تأثيرها في هجرة الأنواع والتدفق الجيني، إذ تمثل السلاسلُ الجبلية في عالمنا عوائقَ في وجه التبادل الجيني منتجةً كائنات حية مختلفة على كلٍّ من جانبي السلسلة. وفي نهاية البرمي كان العيش عند مستوى سطح البحر مكافئاً للتنفس على ارتفاع خمسة آلاف متر، وهو ارتفاع أعلى من قمة رينيه في ولاية واشنطن. لذا، فقد عززت حتى أصغر الارتفاعات هذا الانعزال خلال البرمي، أي إن سلسلة تلال منخفضة كان يمكن أن تعزل كل الحيوانات باستثناء تلك الأكثر تحمّلاً لارتفاع تركيز الأكسجين أو انخفاضه، ومن ثم ستكون النتيجة عالماً مكوّناً من مراكز توطُّن عديدة مجاورة للخطوط الساحلية على مستوى سطح البحر.

ويحتمل أن الهضاب من العديد من القارات كانت خالية من الحياة الحيوانية عدا أكثرها تحمّلاً للارتفاع؛ مما يناقض التوقّعَ المبنيّ على أساس التوضع القاري: إذ إن القارات خلال هذا الوقت البالغ قِدَمُه 250 مليون سنة كانت كلها مندمجة في قارة عملاقة واحدة (شميت بانغيا)؛ مما يجعلنا نتوقع عالماً يحوي قلّةً قليلة من الأقاليم البرية الحيوية لأن الحيوانات كانت تستطيع أن تنتقل من أحد جوانب القارة إلى جانبها الآخر براً دون

أن يعترض طريقها المحيطُ الأطلسي أو سواه؛ لكن الارتفاع صار العقبة الجديدة في وجه الهجرة. ويبدو أنّ دراسات جديدة أُجريت على العديد من أنواع حيوانات الفقاريات ترسم عالماً مؤلفاً من أقاليم حيوية منفصلة كثيرة، في اليابسة على الأقل.

أثبت عمل روجر سميث Roger Smith وجينيفر بوتا Jennifer Botha والمؤلف المشارك وورد Ward في صحراء كارو، وعمل مايك بينتون في روسيا وكريستيان سايدر في نيجيريا[12] في أواخر القرن العشرين وأوائل القرن الحادي والعشرين، أنه كانت لكلّ من هذه المواقع المنفصلة في إفريقيا حيواناتٌ متميزة مختلفة عن بعضها البعض، ومن ثمّ فقد شكّل الارتفاعُ حواجزَ مهمة في وجه الهجرة والتدفق الجيني في أثناء أوقات انخفاض الأكسجين،[13] أي إن أوقات انخفاض الأكسجين تميزت بتعدد أقاليم حيوية منفصلة على الأقل فوق سطح اليابسة. أما في أثناء أوقات ارتفاع تركيز الأكسجين؛ فيحصل العكس، إذ كان هناك انتشار عالميّ لحيوانات وأقاليم حيوية قليلة نسبياً.

لقد تجاوزت تأثيرات هبوط الأكسجين مجرّد جعل السلاسل الجبلية عائقاً أمام الهجرة، فقد حوّل معظم المناطق الواقعة على ارتفاعات أعلى من ألف متر إلى مناطق غير صالحة للعيش في الفترة الزمنية الممتدة خلال البرمي المتأخر وعبر الترياسي. وكان لهذا التأثير المدعوّ الانضغاطَ الارتفاعيّ أثرٌ عظيم في الحياة البرية بالترياسي في أثناء وقت الأكسجين الأكثر انخفاضاً، وربما دفعت إزالة الموئل Habitat المترتب على الانضغاط الارتفاعي بالأنواع القاطنة في المرتفعات إلى الهجرة نحو مستوى سطح البحر أو الفناء. وقد زاد ذلك من حدة المنافسة على الموارد والمساحات وربما أظهر مفترسين جدداً وطفيليات أو أمراضاً جديدة في الأراضي المنخفضة المسكونة سابقاً مسبباً انقراض عدد من الأنواع. ووفق حساباتنا، فإنه في نهاية العصر البرمي لم يعد أكثر من خمسين في المئة من اليابسة على سطح الأرض صالحاً للعيش بسبب الانضغاط الارتفاعي. حتى إنه ربما حصل هناك انقراضٌ ناتج من تأثيرات نمذجها منذ وقت طويل روبرت ماك آرثر Robert MacArthur وإدوارد ويلسون E. O. Wilson في نظرية بيوجغرافيا الجزر *The Theory Of Islands Biogeography*. فقد لاحظ هذان العالمان أن التنوّع مرتبط بمساحة الموئل، ومن ثمّ عندما تتناقص مساحة الجزر أو بعض أشكال الموائل المعزولة تفنى الأنواع. ويُحدِث الانضغاطُ الارتفاعي الشيءَ نفسه عن طريق جعل كتلة اليابسة القارية أسوأ وظيفياً في المناطق القابلة للاستخدام.

استرجاع الانقراض البرمي

يتضح الجانب الأخير المتعلق بالانقراض البرمي من أبحاث لم تُنشر بعد إنما كان صادراً عن المؤلف المشارك وورد. فسوف يورد نتائجه هنا نظراً لأنه وثيق الصلة بموضوع الانقراض الجماعي البرمي. فقد اجتمع طالب دراسات عليا يشرف عليه وورد وهو فريدريك دولي Frederick Dooley مع لي كمب وخرجا بالاشتراك غير متوقع. ويدرس دولي تأثير كبريتيد الهيدروجين في النباتات وبعض الحيوانات فيما يقوم كمب بمحاكاة شروط المحيطات في نهاية البرمي ومن ضمنها الكميات المقدرة لكبريتيد الهيدروجين في الطبقات السطحية للمحيطات القديمة. وقد نظر كمب إلى قيمة استخدمها دولي في التجارب العملية على العوالق النباتية وحيدة الخلية القاطنة في المحيطات إضافة إلى أهم العوالق الحيوانية، أي المخلوقات الشبيهة بالقريدس المسماة مجدافيات الأرجل Copepods. ولم تكن التراكيز كافية لقتل الطحالب بل على عكس المتوقع جعلتها في الواقع تنمو أسرع. أما مجدافيات الأرجل فماتت على الفور. وفي غياب مجدافيات الأرجل التي تتغذى بالعوالق النباتية وتسيطر على كمياتها فإن هذه النباتات الدقيقة تغرق إلى قعر البحر وتحلل هناك مزيلةً آخر آثار الأكسجين، مما سيسبب تذبذباً خطيراً في طراز نظائر الكربون، ناهيك عن قتل كل أنواع الحيوانات البحرية التي تقضي بداية عمرها في عمود المياه الأعلى على شكل عوالق مؤقتة. وبالنتيجة تحصل على كوكب تحتله النباتات المتحللة يكاد يخلو من الحيوانات، وهذا ما حدث بالضبط في نهاية البرمي في المحيطات على الأقل. أما على اليابسة، فمن الممكن أنه قد كان شيئاً شبيهاً إلى حدٍّ بعيد بالحربين العالميتين الأولى والثانية مجتمعتين. ويقدِّم روجر سميث Roger Smith من جنوب إفريقيا اليوم أدلة مقنعة جداً على عصر من الجفاف الاستثنائي والحرارة الباهتة في جنوب إفريقيا منذ 252 مليون سنة، في حين لا يزال عملنا على الثقاريات في كارو والمنشور في عام 2005 السجل الأفضل لانقراض حيوانات اليابسة عبر تلك الحدود.[15] ويعتقد روجر سميث أنّ الجفاف والحرارة وحدهما يمكن أن يفسّرا انقراض معظم الثقاريات. ونحن نرى أن التشبيه بالحرب العالمية مناسب تماماً: جيوش عظيمة تموت في الصحراء، وفي الحرب العالمية الأولى بفعل غاز الكلور السام، أما في ذلك الماضي السحيق فكان الموت في الصحراء جراء كبريتيد الهيدروجين السام في الهواء والبحار.

الانفجار الترياسي: ما بين 252-200 مليون سنة مضت

يُعدّ الإحساس بالانتماء إلى السلك التعليمي بشكل واحداً من أكبر المُتع للأكاديميين، سواء في المعاهد المتوسطة أم في أقوى مؤسسة بحثية في البلد. وينبع كثير من هذا الإحساس من صميم طبيعة نظام الجامعات الأمريكية الذي يتطلب فترة اختبار تستمر ست أو سبع سنوات يليها التثبيت في المنصب. ويتميز السلك التعليمي في الجامعات بثبات أكبر من جميع المهن الأخرى تقريباً وبمعدلات دوران أدنى مقارنة بمعظم المهن، وبالنتيجة قد تستمرّ العلاقات طوال جزء كبير من عمر المرء. ومن هذه الناحية تشبه نُظم السلك التعليمي في الجامعات إلى حدّ بعيد النظامَ الذي انبثقت منه، أي معاهد تعليم اللاهوت الملحقة بالأديرة التي ينضمّ إليها الرهبانُ شباباً صغاراً ويقضون فيها حياتهم جنباً إلى جنب مع الآخرين من أمثالهم. وكما كانت عليه الحال في الأديرة القديمة، يتعلم المرء مع تقدم العمر والحكمة احترام من لديهم خبرة أكبر والاستماع إلى آرائهم.

وفي عام 2000 أو نحوه، كان مؤلفا هذا الكتاب يتناولان الغداء مع عدد من الأعضاء القدامى للسلك التدريسي في كلية العلوم بمعهد كاليفورنيا للتكنولوجيا. وكان بين هؤلاء الرجال المخضرمين سام إبشتاين العظيم Sam Epstein أحدُ أكبر أساتذة الجيوكيمياء تميّزاً وربما أعظم الجيوكيميائيين في كل العصور. وكان سام موجوداً في الأيام الذهبية لجامعة شيكاغو عندما اكتشف هارولد يوري Harold Urey الحاصل على جائزة نوبل في الكيمياء طريقةً لقياس درجة الحرارة التي تشكلت فيها صخور الكربونات القديمة بمقارنة نظائر الأكسجين الموجودة في صخور الكربونات المترسبة، وتباينت نسبة نظير الأكسجين 16- إلى الأكسجين 18- الأكثر ندرة بصورة متناسبة مع درجة حرارة تشكُّلها.

وانتقل سام في النهاية إلى معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا وأمضى حياته المهنية في ابتكار مقاييس عالية الدقة للعديد من أنواع العينات باستخدام عدة منهجيات مختلفة. ويبدو أنّ درجة الحرارة القديمة كانت حُبّه الأول. وبعد غداء رائع اصطحب سام كلاً من كيرشفينك وووورد إلى مختبره في الطابق السفلي والذي كان في طور التفكيك. وكانت المُعدّات الجيوكيميائية التي تعود إلى خمسينات القرن العشرين وستيناته، الأيام التي كان فيها سام في أوج عطائه، تتألف بشكل أساسي من مجموعة متقَنة الصنع من

آنية زجاجية مصنوعة ومنفوخة يدوياً، وأنابيب ذات جدران رقيقة حلزونية متشابكة مشكّلة شبكات زجاجية تشبه شباك العنكبوت، وتعترضها أشكال غريبة شبيهة بالقوارير الزجاجية مع أنابيب مطاطية جيئة وذهاباً ومحابس زجاجية مزيّنة رفيعة الصنع، كل شيء مصنوع بعناية من قبل الحرفيين الذين ضمنوا سير الأبحاث العلمية على مرّ الزمن. الحرفيون المهرة الذين لم يعد لهم وجود في أيامنا بسبب تقليص الميزانيات والأجيال الجديدة من التكنولوجيا الإلكترونية العصرية.

مشينا في أرجاء المختبر وانتقل الحديث إلى موضوع اهتمامنا الشديد: الانقراض الجماعي البرمي وأسبابه المحتملة. ففي ذلك الوقت كانت فرضية الاصطدام لا تزال تُعتبر السبب المحتمل لهذا الانقراض. ولكنّ سام لم يكن يقبلها، والتفت إلينا بابتسامة وأخبرنا قصة قصيرة سنسردها لكم. كان سام قد أخذ في شبابه عينات من حجر الكلس (الجير) البحري التي تعود إلى بدايات العصر الترياسي، هذه العينات كانت قد تكونت على الأرجح في أحد الممرات البحرية السطحية جداً في مكان ما قرب خط الاستواء في العصر البرمي، وهو ما يُعرَف اليوم بإيران. فهل كان ذلك مجرد نزوة، أم لأنه أكثر ما يحب؟ وشرع سام في تحليل العينات لمعرفة درجة حرارتها القديمة، ربما بدافع نزوة أو لأن هذا موضوعه المفضّل. وقد ذُهل، على حدّ تعبيره، حين اكتشف أن جميع تلك العينات كانت قد تكونت في درجات حرارة أعلى من أربعين درجة سيليزية وبعضها تجاوزت حرارة تكوينه خمسين درجة سيليزية، أي بين 104 إلى أكثر من 120 درجة فهرنهايت! وجاءت العينات من الشعاب المرجانية القديمة، وهي مخلوقات تحتاج إلى ماء عادي الملوحة.

قد تشاهدُ درجات حرارة مثل هذه في الأحواض والبحيرات الشاطئية الراكدة، ولكنّ عضديات الأرجل لا تعيش في مثل هذه الأماكن. ومن غير الممكن أن تكون درجات الحرارة التي اكتشفها سام إبشتاين قد تكونت في أيّ مكان على أرضنا، وتروي رواية العالَم التالي للانقراض ذي درجات الحرارة غير المعقولة لمياه المحيط الرئيس.

ابتسم سام ابتسامة حزينة، وكان حينها في الثمانينات من عمره، ولم تبق له من العمر إلا سنة واحدة، وأخبرنا بأنه لم يجرؤ يوماً على نشر هذه البيانات. وحتى يكون أي تحليل لدرجات الحرارة القديمة دقيقاً يجب أن تكون العينات نقية حقاً. وفي كثير من الأحيان تكون العينات التي تبدو كما لو أنها لم تتعرض للتسخين أو المياه الجوفية

أو التغير الكيميائي بصورة واضحة قد تمت بالفعل «إعادة ضبط» درجة حرارة نظائر الأكسجين فيها، وعملية إعادة الضبط هذه تؤدي عادة إلى إنتاج ما يبدو كأنه درجات حرارة مرتفعة بشكل غير معقول، ويزداد شيوع هذه الظاهرة كلما كانت العينةُ أقدم. ولكنّ سام كان مقتنعاً تماماً بأن لديه الدليل على أنّ درجة حرارة مياه المحيط كانت أعلى من مئة درجة فهرنهايت خلال المليون سنة الأولى بعد الانقراض البرمي - أي في المليون سنة الأولى من العصر الترياسي.

وبعد عدة سنوات، وعند تحليل درجات الحرارة القديمة من موقع ترياسيّ سفليّ آخر، وجدنا ما يشبه الماء بدرجة حرارة فاقت مئة درجة فهرنهايت. وفي هذه المرة كان العمق أكبر من الأعماق التي قُدِّرت للمياه القديمة التي نمت فيها عضديات الأرجل الترياسية وفقاً لسام إبشتاين منذ وقت طويل. وكما فعل سام إبشتاين، لم ننشر نحن أيضاً هذه النتائج.

الجبناء لا ينالون الجوائز. فقد قام فريق بحث مشترك صيني أمريكي في عام 2012 بمحاولة لفهم سبب الوقت الطويل الذي استغرقته عودة الحياة للبحار بعد الانقراض البرمي، ونشروا مقالاً مذهلاً حول ذلك.[1] فقد وجدوا أنّ حرارة المياه كانت 104 درجات فهرنهايت (40 درجة سيليزية)؛ أما على اليابسة فبلغت درجات حارقة 140 درجة فهرنهايت (60 درجة سيليزية)! وبخلاف عمل إبشتاين، نشرت هذه الدراسة تحليلا لأكثر من 15 ألف عينة؛ مما جعلها الدراسة الأكثر دقّة وتفصيلاً للشروط البيئية إثر الانقراض البرمي.

وعند استكمالهم لدراستهم، فقد سمح العلماء لأنفسهم بالتفكُّر حول مظهر ذاك العالم القديم الحار. وتموت معظم الكائنات البحرية في درجات الحرارة الأعلى من مئة درجة فهرنهايت (38 درجة سيليزية) التي اكتشفها الباحثون؛ وفي الواقع يتوقف البناء الضوئي أساساً إذا تجاوزت درجة الحرارة هذا المستوى بكثير. وفي ذلك العالم، فإنّ المنطقة الاستوائية بكاملها ستكون خالية من الحيوانات. أما الحياة المعقدة؛ فستكون مقتصرة على خطوط العرض العليا، وحيوانات اليابسة نادرة حتى في خطوط العرض الوسطى. وفي مثل هذه الحرارة يفترض أن تكون رطوبة الهواء هائلة، وأن تبقى المناطق المدارية رطبة على مدار السنة. ولكنْ، لربما كانت المناطق المدارية صحاري رطبة بلا أي حياة نباتية فيها.

ويتبيّن الآن من التاريخ الجيولوجي أفضل من أيّ وقت مضى أن وقت درجات الحرارة العالية امتدّ أول ثلاثة ملايين سنة من الترياسي على الأقل، ولربما كانت ترتفع خلال ذلك الوقت أكثر من أيّ وقت مضى، وبلغت أوجها في الفترة الزمنية المعروفة بالمرحلة السميثية Smithian stage (فترة زمنية امتدّت مليون سنة نحو 247 مليون سنة مضت) التي شوهدت فيها أعلى درجات الحرارة المعروفة منذ ظهور أوائل الحيوانات. فقد كان سام إبشتاين مُحقاً، والبيانات التي حصلنا عليها من جدول أوبال Opal Creek[2] كانت صحيحة، وقد أخطأنا بعدم نشرنا لهذه البيانات.

من الواضح أن الانقراض البرمي كان أحد أكثر الأحداث كارثية بين جميع الانقراضات. طبعاً، بالنسبة إلى النباتات أو الحيوانات متعددة الخلايا. أما بالنسبة إلى الميكروبات (وخاصة تلك المحبة للكبريت والكارهة للأكسجين والتي شكّلت معظم جميع أشكال الحياة على الأرض منذ ابتدائها وحتى التطور الأول للحيوانات) كان ذلك الحدث أشبه بالعودة إلى الجنة. ومن وجهة نظرنا كمراقبين بعد مدة طويلة، فقد كان الانقراض البرمي تكراراً لما حصل في نهاية الديفوني، ذلك الانقراض الأول بين ما يعرف الآن بانقراضات الدفيئة. وكان هناك المزيد في طريقه إلى الحدوث في نهاية الترياسي وعدة مرات في الجوراسي والطباشيري، وانتهت بالانقراض في نهاية الباليوسين وهو آخر انقراض دفيئة معروف، وقع منذ نحو ستين مليون سنة. ولكن لم يكن أيّ منها بعَظَمة الحدث البرمي أو بقدرته على إطلاق العنان لظهور تجمعات حيوانية أكثر تنوّعاً إثر الانقراض.

لقد أعطى الانقراض البرمي العالَم مخلوقات جديدة كثيرة، أما بالنسبة إلينا، فتهمنا سلالتان جديدتان كلياً ازدهرتا وتطورتا في نهاية العصر الترياسي. فالعصر البرمي كان عاملاً رئيساً في خلق الثدييات، كما نتجت منه وسائل كان من شأنها أن تخلق عدوّاً طويل الأمد، الديناصورات. أيضاً، وبينما تُعتبر من بين أهم الحيوانات البرية كلها (مُنحت مجموعات حيوانية قليلة كلمة «عصر...» قبل أسمائها) كانت الديناصورات والثدييات في الترياسي من الوافدين المتأخرين في الانفجار الترياسي، وبقيت ذات مكانة صغيرة نسبياً (خاصة الثدييات التي نادراً ما تجاوزت حجم الجرذ) وقليلة من حيث وفرتها المطلقة وتنوّعها. ولم يبدأ عصر الديناصورات حتى العصر الجوراسي التالي، في حين كان عصر الثدييات الجاري لا يزال بانتظار الحقبة الحديثة.

وقبل وقت طويل من خروج الديناصورات والثدييات المتأخر (في الترياسي) إلى مسرح التطور، كانت باقي الحيوانات والنباتات في العصر الترياسي تؤلف التجمع الأكثر

إثارة للاهتمام بين أنماط الكائنات الحية، سبيكة من النسخ الجديدة من الأصناف التي استمرّ وجودها لوقت طويل مختلطة مع الداخلين الجدد، ونشأت تصاميم جديدة عن الكائنات التي بقيت على قيد الحياة منذ حقبة الحياة القديمة، ومع ذلك مختلفة جذرياً عن تصاميم أسلافهم. إنّ هذا المزيج هو الذي جعل من الترياسي يبدو مفترق طرق زمنياً حقيقياً. ولم يكن مختلفاً في بعض نواحيه عن الانفجار الكامبري: أعداد كبيرة جداً من مخططات أجسام حيوانات مبتكرة حديثاً قامت بملء العالم الفارغ، مثلما تطورت الحيوانات الأولى بسرعة إلى وفرة من مخططات الأجسام التي ملأت البحار بعد انقراض الحيوانات الأولى، الإدياكاريات (كائنات إدياكارية). وكما في الانفجار الكامبري الكبير، فقد اتضح أنّ العديد من مخططات الأجسام ليست إلا تجارب على المدى القصير، قد دُفعت للانقراض بالمنافسة و/أو الافتراس من قبل كائنات أفضل تصميماً. ولا توجد فترة زمنية ظهر فيها هذا التنوّع العظيم من الأشكال الجديدة إلا في الكامبري والترياسي. ويوجد سببان أساسيان لذلك: أفرغ الانقراضُ البرمي العالم إلى درجة يكاد يكون فيها فعلياً أيُّ تصميم جديد ذا كفاءة، على الأقل لبعض الوقت. إلا أن السبب الثاني، وهو النظرة الجديدة للترياسي، قد يكون بأهمية السابق (وربما أهم منه).

وفور الخروج من أكثر الانقراضات الجماعية تدميراً على الإطلاق، كان العالم الترياسي الباكر فقيراً جداً جداً بالحياة. وفي الوقت نفسه تدلّ جميع النماذج على وجود فترة زمنية طويلة في الترياسي كانت فيها تراكيز الأكسجين أقلّ مما هي عليه اليوم. وقد أشرنا سابقاً إلى أنّ أوقات انخفاض الأكسجين، خاصة تلك التي تتلو الانقراض الجماعي، تعزّزُ التباين: أي تنوع مخططات الأجسام الجديدة. واجتمع هذان العاملان لخلق أكبر عدد من مخططات الأجسام الجديدة شوهد منذ الكامبري، ونقترح هنا أن ذلك الوقت المؤثر في الكامبري تكون مقارنة الترياسي به مبررة تماماً، ونسمّي ذلك الوقت وعواقبه الحيوية بالانفجار الترياسي.

وكان الترياسي هو الوقت الذي حدث فيه تباين مذهل على البر وفي البحر. ففي البحر حلّت سلالات جديدة من الرخويات ذات المصراعين محل عضديات الأرجل المنقرضة، في حين حدث تنوُّع كبير للأمونيتات والناوتيلويدات التي أعادت ملء المحيطات بمفترسات نشيطة. وفي الصخور الترياسية عُثِر على ربع جميع الأمونيتات التي عاشت يوماً، وهي فترة زمنية تشكل عشرة في المئة فقط من مدة وجودها الكلية على الأرض. وامتلأت المحيطات بأنواعها، بأشكال ونماذج جديدة كلياً مقارنة بأسلافها في الحقبة

الأولية. ولِمَ لا، فكما رأينا سابقاً، كان هذا الشكل من الحيوانات متفوقاً وتكيّف مع نقص الأكسجين أكثر من جميع اللافقاريات. وبدأ شكل جديد من المرجان، وهو السكليراكتينيا Scleractinians، ببناء الشعاب[3]، وعاد كثير من الزواحف البرية إلى البحر. لكن اليابسة هي التي شهدت التغيرات الأكثر جذرية في استبدال مخططات الأجسام وتجريبها. فلم يشهد العالم قبل ذلك الوقت ولا بعده وجودَ مجموعة من التراكيب التشريحية المختلفة بمثل هذا التنوع على اليابسة. وبعضها كان أنواعاً مألوفة في البرمي: فالثيرابسيدات التي نجت من الانقراض البرمي تنوعت وتنافست مع الأركوصورات Archosaurs للهيمنة على اليابسة في وقت باكر من الترياسي، لكن هذا الصعود لم يدم طويلاً، وعَلِقت الأنواع العديدة من الزواحف في صراع التنافس معهم ومع بعضها بعضاً للهيمنة على اليابسة وابتداءً من الزواحف الشبيهة بالثدييات إلى السحالي، الثدييات الباكرة إلى الحقيقية فقد شكّل الترياسي تجربة كبيرة للتصاميم الحيوانية.

قد يبدو لأول وهلة أن الثدييات يجب أن تتفوق تنافسياً على الزواحف البحتة فمعظم الزواحف الشبيهة بالثدييات كانت في ذلك الوقت من ذوات الدم الحار، قادرة على الأرجح (كما هي حالها اليوم) على تقديم رعاية والدية أكثر من الديناصورات التي يفترض أنها كانت تضع البيض؛ وكانت أسنان الثدييات أحد الأسباب الرئيسة التي مكنتها من الهيمنة على العالم في نهاية المطاف، حيث سمحت لها أشكال أسنانها المطواعة بلا حدود بالحصول على جميع أنواع الطعام من البذور الصغيرة والأعشاب إلى شتى أنواع اللحوم. ومع ذلك فهي لم تربح. وأنهى انقراضها الزمن الأول للثدييات وأدى إلى انبثاق زمنها الثاني الذي تألّف من مجموعة مختلفة جداً من الثدييات.

وأحد التغيرات الكبرى الذي سمح ولا يزال بإجراء أنواع جديدة تماماً من الدراسات لكل مجموعات الحيوانات المنقرضة، هو الثورة العظيمة في مجال الاتصالات التي يعود إليها الفضل في تقدم التوصيف المورفولوجي وتحليل الصور ومهارات البحث المتعمق في المنشورات العلمية. والآن يمكن أنْ تَنتُج قواعدُ بيانات ضخمة ويتمّ البحث فيها وتحليلها بسرعة البرق ببراعة بواسطة معالج ميكروي.

لم تعدْ بحاجة إلى بذل جهد لقياس كل أحفورة يدوياً بواسطة مقاييس ميكرومترية ولم يعد الباحث ينتقل بمفرده من متحف إلى آخر لإنجاز عمله. فكل الدراسات الجديدة تقريباً التي تؤدي إلى تغييرات في نظرتنا إلى تاريخ الحياة تكون من حصيلة عمل فرق

كبيرة من الباحثين الذين يُدخلون في النهاية أعداداً كبيرة من الأرقام ليتمّ تحليلها. وتقوم الآلات بجزء لا بأس به من هذا العمل، وتمنحنا النتائج معارف وإدراكات جديدة.

وفي إحدى هذه الدراسات التي أجراها عالما الأحافير رولاند سوكياس Roland Sookias ولودفيغ ماكسيميليان Ludwig Maximilian من جامعة ميونيخ، كانا قد بحثا في أحجام فقاريات الترياسي التي عاشت على اليابسة.

وفي هذا العمل والأعمال اللاحقة له التي أجراها هذا الفريق البحثي وُجد أنه قد ظهر في الترياسي الباكر نوعان رئيسان من مخططات الجسم وسط الفراغ الذي خلّفه الانقراض الجماعي البرمي: يضمّ النوع الأول الكائنات ذات أربع قوائم (رباعيات الحركة Quadrupeds)، ويضم الثاني الكائنات التي تستخدم قائمتين فقط (ثنائيات الحركة Bipeds). و قد اكتشفوا أنه مع مضي العصر الترياسي الذي امتدّ قرابة خمسين مليون سنة إلى العصر الجوراسي الذي امتدّ بدوره خمسين مليون سنة أيضاً فقد تنوعت الصوريات Saurians إلى عدد أكبر بكثير من الأنواع والأشكال (وبالتأكيد كانت أكبر حجماً، وهو أحد مقاييس التباين)، مقارنة بالزواحف الشبيهة بالثدييات. ومع أن علماء الأحافير طالما عرفوا ذلك بالحدس من خلال دراستهم لمجموعات الأحافير في المتاحف، فقد جاءت الأرقام للمرة الأولى لتأكيد حدسهم.

كما أثبتت دراستهم أنّ الصوريات كانت تنمو أسرع فتصل إلى عمر البلوغ والحجم الكبير أسرع مقارنة بالمجموعة الأخرى. فهذا الاختلاف في «الزمن حتى التناسل» ربما يكون الأكثر أهمية بين المقاييس كلها. ويعني النموُّ الأسرعُ والتكاثر أنّ السحالي تكيّفت بسرعة مع الأدوار البيئية للعواشب الكبيرة والمفترسات الضخمة قبل أن تحظى الثيرابسيدات الأصغر والأبطأ نمواً بفرصتها في التطور إلى هذه الأشكال التشريحية والفراغات الإيكولوجية.

وتبقى هناك الأسئلة. فعندما ترسخ وجود الديناصورات خلال الترياسي المتأخر كان من المتوقَّع أن تنمو مباشرة إلى أحجام كبيرة، مثل أحجامها في الجوراسي، وأن تكون بنفس شيوعها في الجوراسي أيضاً. ولكن لم يحدث أيٌّ من الأمرين وفقاً لعالم الأحافير من جامعة شيكاغو بول سيرينو Paul Sereno، الذي قام باكتشافات أكثر من أيّ شخص آخر حول بدايات أوقات سيطرة الديناصورات. فقد بقيت الديناصورات والثيرابسيدات على حدّ سواء نادرة وصغيرة الحجم نسبياً على مدار عشرين مليون سنة تقريباً بدءاً من ظهورها الأول، أي منذ 221 مليون سنة مضت

وحتى نهاية الترياسي منذ نحو 201 مليون سنة مضت.[4] ولربما كانت أكثر عدداً من الثيرابسيدات خلال ذلك الوقت، لكن الصورة الإجمالية هي أنه لم يكن زمن ازدهار بالنسبة إلى أيٍّ من المجموعتين. ونرى أنه في ذاك الزمن لم يكن ملائماً لازدهار أي شيء قط، وفي الواقع ربما أفضل ما كان يمكن أن تفعله الحيوانات رباعية الحركة هو العودة إلى البحر، وهذا ما فعلته خلال العصر الترياسي بأعداد أكبر من أي وقت آخر في تاريخ الأرض.

إنّ الجوابَ التقليدي عن سبب الانفجار الترياسي هو أنّ الانقراض البرمي أزال العديد من حيوانات اليابسة المهيمنة؛ مما أفسح مجالاً للابتكار أكثر من أيِّ وقت آخر خارج الانقراض، بل ربما أكثر من أيِّ انقراض جماعيّ آخر. ولربما بلغ العديد من مخططات أجسام الحيوانات الأرضية مِفصلاً تطورياً عندما صارت تعمل بكفاءة فعلية. وحتى في نهاية البرمي وفي الترياسي كانت المجموعات الناضجة تطورياً مثل الزواحف الشبيهة بالثدييات (أي مجموعات الديسينودونتات والسينودونت حينها) لا تزال تحاول تحقيق الوضعية المنتصبة الأكثر كفاءة بدلاً من وضعية القدم المفلطحة Splayed leg orientation الأقل كفاءة التي تتخذها الزواحف البرية، مع كل التبعات والسلبيات المترتبة على ذلك.

كانت مخططات الأجسام تخضع لتعديلات تطورية بفعل ضغوط انتخابية هائلة، وكان الضغط المهيمن بينها هو الحاجة إلى الحصول على الأكسجين الكافي للاغتذاء والتناسل والتنافس في عالم قليلِ الأكسجين. فهناك مثل قديم يقول إنه ما من شيء يَشحذُ حدَّة الذهن أسرع من الموت الوشيك. وينطبق هذا المثل على القوى التطورية عند مواجهتها لأكثر الضغوط الانتخابية إلحاحاً، أي الحصول على الأكسجين الضروري للمستويات المرتفعة من النشاط الحيواني التي اكتُسبت تطورياً في العالم البرمي مرتفع الأكسجين عندما كان استخلاصه من الغلاف الجوي بين أسهل المهام. وقد أشعل هبوط الأكسجين الجوي بمقدار الثلثين بكل تأكيد فتيل قنبلة تطورية انفجرت في الترياسي. ومن ثم، فإن تنوع مخططات أجسام الحيوانات الترياسية يضاهي تنوع مخططات أجسام الحيوانات البحرية التي نتجت من الانفجار الكامبري، إذ كان الانفجار الكامبري تالياً لانقراض جماعيّ للحيوانات الإدياكاري كما أشرنا سابقاً، وكان تركيز الأكسجين وقتها أدنى منه اليوم؛ مما حفز كثيراً من التصاميم الجديدة.

الانتعاش الترياسي

تمتد الفترة الزمنية المحدَّدة رسمياً للترياسي الباكر من 250 إلى نحو 245 مليون سنة مضت، ولم يتحقق خلالها إلا القليل من التقدم نحو التعافي من الانقراض الجماعي. وقصة الأكسجين في الترياسي مذهلة، إذ هبطت تراكيز الأكسجين إلى أدنى مستوياتها، بين 10 و15 في المئة، وبقيت عليها لخمسة ملايين سنة على الأقل، من 245 إلى 240 مليون سنة، كما يوجد سجلّ مشوِّق من هذا الوقت يُظهر تذبذبات واسعةَ النطاق لنظائر الكربون؛ مما يشير إلى أنّ دورة الكربون بحدّ ذاتها كانت مضطربة فيما يبدو أنه إما تتابع لدفقات الميثان إلى المحيطات والغلاف الجوي أو تتابع لانقراضات على نطاق ضيق. ومن جديد يبرز التشابه الصاعق بالكامبري الباكر.

ترسم كلُّ الأدلة بالتأكيد صورةً عن عالم قاس ويشكل تحديا بيئياً بالنسبة إلى الحياة الحيوانية. ولربما ازدهرت الميكروبات، ولا سيما تلك التي تُثبّت الكبريت، أما الحيوانات فقد مرّت بمدة طويلة من الأوقات الصعبة. ومع ذلك، فإن تلك الأوقات الصعبة هي خير ما يسوق عجلة التطور والابتكار؛ إذ ظهرت إثر الهبوط الأكبر للأكسجين على كوكب الأرض أنواع جديدة من الحيوانات يتمتع أغلبها بأجهزة تنفسية قادرة على التعامل بشكل أفضل مع أزمة الأكسجين الواسعة. هذا، وانبعثت على اليابسة مجموعتان من قلب الحطام: الثدييات والديناصورات، الأولى تحولت إلى لاعب احتياط فيما سادت الثانيةُ العالَم.

وكما رأينا في الفصل الماضي، أباد الانقراض البرمي كلَّ الحياة البرية تقريباً. فقد كانت الثيرابسيدات الأكثر تضرراً، لكننا لا نعرف إلا القليل عن أركوصوريات الشكل *Archosauromorphs* (وهي زواحف ذات تشريح يشبه نوعاً ما التماسيح)، إذ إنها تؤلف في نهاية البرمي مجموعة نادرة وقليلة المصادفة في المناطق مثل كارو وروسيا التي أسفرت عن ترسبات غنية ذات حيوانات وافرة من الديسينودونتات (الزواحف الشبيهة بالثدييات). على الأقل، في صحراء كارو على الأقل، لم تكتشف إلا قِلّة قليلة من أركوصوريات الشكل المحفوظة جيداً من المقاطع الأعلى المدروسة من البرمي التي أجراها المؤلفان المشاركان وورد وكيرشفنك بالمشاركة مع روجر سميث Roger Smith من جنوب إفريقيا.

ومع أن معلوماتنا عن أسلاف أركوصوريات الشكل في البرمي لا تزال ضئيلة، فليس هناك أي شكّ في نجاحها في أوائل الترياسي، إذ توجد في الأمتار القليلة فقط من الطبقات التي يبدو أنها تحدد الانتقال من البرمي إلى الترياسي في كارو، بقايا شائعة

نسبياً لزاحف كبير نسبياً معروف بـ بروتيروزوخوس *Proterosuchus* (ويُعرف أيضاً بـ التشازماتوصور *Chasmatosaurus*) الذي كان بكل تأكيد حيواناً برياً ذا مجموعة مثيرة للإعجاب من الأسنان الحادة الثاقبة. وكان حيواناً برياً بلا ريب ذا مجموعة أسنان مدببة حادة مذهلة، كان حيواناً مفترساً بالتأكيد، لكن أرجله كانت مفلطحة Splayed gait على غرار أرجل التماسيح (حتى وإن كانت نوعاً ما أكثر انتصاباً منها عند التمساح). إلا أنه سرعان ما تحول هذا الوضع في أركوصوريات الشكل إلى توجه أكثر انتصاباً مع تقدم الترياسي، وسرعان ما حلت كائنات مفترسة أسرع وأكثر رشاقة محل أركوصوريات الشكل الباكرة مثل البروتيروزوخوس.

وربما كانت الحاجة إلى القدرة على التنفس في أثناء المشي مهمة بقدر الحاجة إلى السرعة التي شكلت بكل تأكيد دافعاً لاتخاذ هذه الوضعية الحركية المحسّنة. وربما كان جسم البروتيروزوخوس لا يزال يترنح جيئة وذهاباً في أثناء المشي مثل أجسام السحالي. وكما رأينا سابقاً، يسبّب هذا النمط من التنقل ضغطاً على منطقة الرئة بحسب ما يُعرف بتقييد كارير،[5] أي المبدأ القائل إنّ رباعيات الحركة ذات الأرجل المفلطحة Splayed gait legs لا تستطيع التنفس في أثناء سيرها لأن جسدها المتلوّي من جانب إلى آخر يضغط على الرئة والقفص الصدري فيمنع الشهيق؛ ولهذا السبب لا تستطيع السحالي والسلمندرات التنفس في أثناء المشي، وربما كان البروتيروزوخوس يعاني جزئياً هذا التأثير، وإن لم يكن بشدة التأثير عند السحالي والسلمندرات في يومنا هذا.

وأحد الحلول هو وضع الأرجل تحت الجسم لكنه ليس إلا حلاً جزئياً.[6] وكان من الضروري إحداث تعديلات واسعة على الجهاز التنفسي إضافة إلى الجهاز الحركي للتحرر حقاً من التقييد الذي فرضه التنفس على الوضعية. ووجدت السلالةُ التي انبثقت عنها الديناصورات والطيور تكيفاً جديداً وفعالاً للتغلب على مشكلة التنفس هذه، وهو المشي على قائمتين، إذ تحرّرت بذلك من تقييدات الحركة والوظيفة الرئوية بواسطة التخلص من وضعية الحركة الرباعية. كما حقق أجدادُ الثدييات ابتكاراتٍ جديدة من ضمنها الحنك الثانوي (الذي سمح بالأكل والتنفس المتزامنين)، إضافة إلى الوضعية المنتصبة الكاملة (رغم بقائها رباعية الحركة). ولكن هذا لم يكن كافياً، فتطور نوع جديد من أجهزة التنفس. إذ سمحت مجموعة قوية من العضلات تدعى الحجاب الحاجز بتكوين جهاز أكثر قوة بكثير واستنشاق الهواء ثم زفره.

وتوجد أدلة أخرى، عدا عظام الديناصورات، لطبيعة الحياة على الأرض والتحديات التي واجهتها خلال أوقات انخفاض الأكسجين في الترياسي. وكان تنوُّع الزواحف العائدة إلى البحر جزءاً من الانفجار الترياسي. وقد قامت سلالات منفصلة عديدة بذلك، ويمكن عزو الأسباب المؤدية لحصول هذا إلى المشكلات التي فرضها العالم الترياسي الحار ومنخفض الأكسجين.

إن الأكسجين ضروري لسير التفاعلات الاستقلابية في الحيوانات؛ فهو يتيح التفاعلات الكيميائية التي تشكّل عين الحياة. إلا أنه، كما في تجربة كيميائية، تؤثر في التفاعلات عوامل عديدة، من أهمها الحرارة. فسرعة الاستقلاب هي الوتيرة التي يستخدم المتعضي بها الطاقة، وهي أعلى بكثير عند داخليات الحرارة (ذوات الدم الحار) منها عند خارجيات الحرارة، لكنها تتأثر بشكل مباشر ومهم، حتى في المتعضي نفسه، بدرجة الحرارة إلى حدّ مفاجئ. وقد أثبتت دراسات حديثة أنّ ما بين ثلث ونصف نفقات الطاقة كلها عند الحيوان يُصرَف ببساطة للبقاء على قيد الحياة، من خلال نشاطات كاستقلاب البروتين وضخّ الشوارد ودوران الدم والتنفس، ثم تأتي النشاطات الضرورية الأخرى كالحركة والتكاثر والإطعام والسلوكات الأخرى. وترتفع سرعة استخدام «الوقود» بارتفاع درجة الحرارة.[7] إلا أنه مع ارتفاع سرعة الاستقلاب تزداد الحاجة للأكسجين، إذ إنّ التفاعلات الكيميائية الحيوية معتمدة على الأكسجين. والاكتشاف الرئيس هو أنّ سرعة الاستقلاب تزداد من ضعفين إلى ثلاثة أضعاف لكل ارتفاع في درجة الحرارة بمقدار عشر درجات. وتبعات ذلك عظيمة في عالم الأكسجين فيه أقل ودرجات الحرارة الوسطية أعلى من الآن.

لا توجد علاقة مباشرة بين درجة الحرارة وتراكيز الأكسجين في الغلاف الجوي، لكن توجد علاقة مباشرة بين درجة الحرارة وثاني أكسيد الكربون، وهو تأثير الدفيئة المشهور. وكما رأينا في الفصل 3، فالعلاقة بين تراكيز الأكسجين وثاني أكسيد الكربون في الجو علاقة عكسية: فعندما يرتفع الأكسجين ينخفض ثاني أكسيد الكربون والعكس بالعكس. فقد كان ثاني أكسيد الكربون مرتفعاً في العديد من الفترات الزمنية التي انخفض فيها الأكسجين في الماضي، ومن ثمَّ كانت تلك الأزمنة حارة، وفي عالم حارّ منخفض الأكسجين يخسر الحيوان. سبق ورأينا حلولاً عديدة للتعامل مع انخفاض الأكسجين، أحدها هو الحل البسيط لإبقاء الجسم بارداً. وبعض الحلول للمحافظة على برودة الجسم - أو البرودة الكافية على الأقل - هي حلول فيسيولوجية؛ وبعضها الآخر حلول سلوكية.

كما يشكل أحدها حلاً مورفولوجياً وفيسيولوجياً وسلوكياً في الوقت نفسه إنه العودة إلى البحر. إذ سيكون المحيط بشكل أساسيّ أبرد، من وجهة النظر الفيسيولوجية، حتى في أحرّ عوالم الماضي. ولهذا السبب ربما استعاض العديد من الحيوانات البرية في الحقبة الوسطى عن أقدامه بالزعانف وعادت إلى البحر بسرعة مذهلة.

وكما أشرنا سابقاً في هذا الفصل، صارت نسبة متزايدة من تنوع رباعيات الأرجل تتألف من حيوانات أعادت تطوير أسلوب معيشة بحري، في ذلك الوقت الذي سادت فيه درجات حرارة أعلى (ربما 30 درجة فهرنهايت (17 درجة سيليزية) أدفأ في الواقع من المتوسط العالمي) ونسبة أكسجين تعادل نصف ما هي عليه اليوم. ولم يحدث قبل ذلك الوقت ولا بعده أنْ ترك هذا العدد الكبير من السلالات اليابسة إلى البحر. ونفرح اليوم بالأشكال العديدة من عائلات الحيتان والفقمات البطريق وأصل هذه المجموعات الثلاث من قاطني اليابسة والتي تُظهر الآن أعظم التكيفات البحرية. إلا أن الحيتان والفقمات تشكل مجتمعة اثنين في المئة فقط من كل أجناس الثدييات، والبطاريق واحداً في المئة فقط من الطيور. ولكن المحيطات في الترياسي كانت فيها أنواع أكثر عدداً من هذه المخلوقات المتحولة، أي الحيوانات المتكيفة مع اليابسة التي قامت باستعادة مخططات أجسام من أجل الحياة في البحر. وكانت في الترياسي إكتيوصورات عملاقة إضافة إلى رباعيات الأرجل التي تنزل إلى البحر مثل لوحيات الأسنان Placodontia (وهذه الأخيرة كانت كالفقمات الكبيرة لكنها بخلافها كانت لها أسناناً كليلة تطورت على ما يبدو لكسر الأصداف)؛ وبقيت الإكتيوصورات في الجوراسي حيث انضمّت إليها حشود من البليسيوصورات طويلة الأعناق وقصيرتها، ثم اختفت الإكتيوصورات في الطباشيري لتحل الموزاصورات الضخمة محلها ولكن كانت لها كلها قضية مشتركة، وهي العودة إلى المحيط.

وتأكد وجود كل هذه الوفرة من رباعيات الأرجل البحرية بفضل الأبحاث المهمة لخبيرة الزواحف البحرية ناتالي بارديه Nathalie Bardet التي نشرت سنة 1994 مراجعة عن كل أنواع عائلات الزواحف البحرية المعروفة في الحقبة الوسطى، وكانت المفاجأة أنه كان يوجد كثير منها نسبياً في العصر الترياسي. ولكن، لماذا طوّرت كل هذه الحيوانات العديدة أسلوبَ معيشة بحرياً؟

لقد كان العاملان البيئيان السائدان وقتها هما: انخفاض الأكسجين، وارتفاع درجات حرارة العالم لكوكبنا. وطرح رايٍ هيوي Ray Huey أيضاً، وهو متخصص بالزواحف من جامعة واشنطن، رأيا مفاده أنّ الحرارة المرتفعة في الترياسي الباكر وعبر الجوراسي كانت

حافزاً تطورياً لبعض الزواحف للعودة إلى البحر. وفي الواقع، بيّن المؤلف المشارك وورد في عام 2006 أن هناك ترابطاً عكسياً مثيرا للاهتمام بين تراكيز الأكسجين في الحقبة الوسطى وأعداد الزواحف البحرية. فعندما كان الأكسجين منخفضاً، كانت النسبة السيليزية للزواحف البحرية مرتفعة. ولكن مع ارتفاع تركيز الأكسجين، فقد هبطت بشكل ملحوظ نسبة عائلات رباعيات الأرجل المائية. وربما لا يعني هذا تناقص العدد الكلي من الأشكال البحرية إنما الازدياد الملحوظ في عدد الديناصورات البرية، ومع ذلك يحدد هذا الأمر منظراً جديداً وغير اعتيادي لكوكب الدفيئة المتمثّل بالأرض في الحقبة الوسطى.

الانقراض الجماعي الترياسي الجوراسي

أحد الاكتشافات الجديدة اللافتة المتعلقة بقيم الأكسجين عبر الوقت هو تراكيزه في الترياسي. وقبل عدة سنوات فقط تبيّن أنّ تراكيز الأكسجين الدنيا في الثلاثمئة مليون سنة الماضية ثبتت نوعاً ما على مستوى العالم في الحدّ بين البرمي والترياسي، قبل 252 مليون سنة. وانتقل وقت انخفاض الأكسجين، وربما صار يتوافق الآن مع الحدّ بين الترياسي والجوراسي (T-J) قبل نحو 200 مليون سنة أكثر مما كان يُعتقد سابقاً. وهكذا، بدلاً من أن يكون الترياسي هو وقت ارتفاع تركيز الأكسجين، أو حتى الوقت الذي حدث فيه انخفاضان - الأول في نهاية البرمي والثاني في نهاية الترياسي - نحن الآن أمام احتمال مفاده أن تراكيز الأكسجين كانت أقلّ في الترياسي المتأخر مقارنة بالجزء الباكر من هذا العصر، ولربما كان الأكسجين يشكل عشرة في المئة من الغلاف الجوي عند مستوى البحر، أو نحو نصف تراكيزه في العصر الحديث. ويتصادف هذا الوقت مع أحد التغيرات الكبرى في الترياسي وهو غربلة معظم فقاريات اليابسة باستثناء الديناصورات الأولى.

إن سبب هذا الانقراض الجماعي، كغيره من الانقراضات، لطالما كان موضع جدل. ومن المعروف أنّ الانقراض الجماعي الترياسي الجوراسي، على غرار نظيره البرمي، نتج من حرارة مميتة (حرفياً ومجازياً) مع واحد من أكبر اندفاعات فيضان البازلت في تاريخ الأرض، لم يتفوق عليه إلا حدث مصاطب سيبيريا في البرمي المتأخر. وقد رُبط بين الانقراضين الجماعيين المتتاليين، بفاصل خمسين مليون سنة بينهما، زمنياً بالفيضانات البازلتية الكبيرة، وهي أحداث معروف عنها جيداً أنها ترفع تراكيز ثاني أكسيد الكربون بسرعة في كل من الهواء والبحر إلى أضعاف مضاعفة لتراكيزها الابتدائية. وتضع بعضُ التقديرات تراكيزَ ثاني أكسيد الكربون الذروية في

الغلاف الجوي عند 2000-3000 جزء في المليون مقارنة بـ400 جزء في المليون في عام 2014 (علماً أنها ترتفع بسرعة!).

إن الاندثار التام للحياة النباتية يؤثّر في دورة الكربون ويغيّر نسبة نظائر الكربون (نظير الكربون 12- إلى الكربون 13-). ويبدو أنّ استخدام هذه المقارنة، أي تحليل نظائر الكربون التي نوقشت في عدة مواضع من هذا الكتاب، النقطة المشتركة بين الانقراضات الجماعية. ولكنّ هذا الاضطراب في نظائر الكربون لم يكتشف حتى نشر تقرير وورد وآخرين في عام 2001 من الطبقات التي تعود للمجال الترياسي الجوراسي T-J المحتضَنة على طول الشاطئ المواجه لإحدى الغابات المطيرة المعمرة الباردة في جزر الملكة شارلوت التابعة لكولومبيا البريطانية.[9] وكما هي الحال في انقراضي الدفيئة في الديفوني والبرمي السابقين لهذا الانقراض، تتميّز الإشارة المكتشفة حديثاً بالتغيرات المتذبذبة في نسبة الكربون 13- إلى الكربون 12- الناجمة عن التغيرات في وفرة وأشكال وتاريخ دفن أنواع الحياة المتنوعة على الكوكب.

وعلى غرار الأحداث في الديفوني والبرمي، يبدو أنّ الإشارة تدلّ على أنّ هذا الانقراض مثل غيره قد حدث نتيجة شيء غير الاصطدام. وطُعِن بصحة الاستنتاج القائل إن الانقراض الترياسي الجوراسي T-J هو أحد أفراد «عائلة» انقراضات الدفيئة لمدة وجيزة بفضل اكتشاف من نوع آخر بُعيد التبليغ عن أول انزياح لنظائر الكربون. فقد أعلن بول أولسن Paul Olsen وزملاؤه من جامعة كولومبيا محدثين ضجة كبيرة في الإعلام أن سبب الانقراض الترياسي الجوراسي T-J، في الواقع، قد حدث نتيجة اصطدام جسم كبير بالأرض. ويبدو أن هذا يقدّم تناظراً جميلاً، حيث أنهى كويكب زمن الديناصورات، وعلى ما يبدو أيضاً استهل كويكب آخر، سبقه بنحو 135 مليون سنة، زمن الديناصورات ذاته، أو هذا ما كان يبدو في البداية. ووُجدت الأدلة (على الاصطدام) التي استخدمها أولسن في منطقة نيوآرك في نيو جرسي موطنِ التجمّع الأكثر تنوّعاً على كوكبنا لآثار أقدام الديناصورات في الترياسي المتأخر والجوراسي الباكر. وقد كان ترافق الديناصورات والموت الجماعي هو ما أثار شهية الإعلاميين للتغطية الإعلامية الواسعة.

وذكر أولسن وزملاؤه عن شذوذ الإيريديوم من شرائح الحدود القارية الترياسية الجوراسية T-J في نيوجرسي. ومثل هذا الشذوذ نبّه لأول مرة فريق ألفاريز Alvarez (في عام 1980) لاحتمال حدوث اصطدام في نهاية الطباشيري؛ وصار الإيريديوم هو المعيار الذهبي للأدلة على الاصطدام. ولكن الدراستين تباعدتا هنا بشكل كبير، ففي حين اتبعت مجموعة ألفاريز الأدلة الفيزيائية والجيوكيميائية من قسمها على الحدود الإيطالية مع البيانات التي تثبت حدوث الانقراض الجماعي لأشكال الحياة الصغيرة المحيطات

في وقت الاصطدام نفسه، جاء مقال أولسن عن الحدث الترياسي بعد الأدلة الفيزيائية والجيوكيميائية بالعكس تماماً: فقد وجدوا أنه بدلاً من القضاء على معظم أشكال الحياة في ذلك القسم، فقد عمل الاصطدام كسماد حيوي ونتج منه حياة أكثر وأضخم!

كانت مجموعة أولسن تأخذ العينات من الطبقات المترسبة على اليابسة (أو على الأصح في الجداول والبحيرات الضحلة على اليابسة)، وكانت «الأحافير» التي درسوها عبارة عن آثار أقدام وليست بقايا لأجزاء من الجسم. وعلى الرغم من هذه الاختلافات المدهشة فقد توصل أولسن وزملاؤه إلى الاستنتاج نفسه: ضرب كويكب ضخم الأرضَ (هذه المرة منذ 200 مليون سنة، أي الحدود الترياسية الجوراسية)، وأنه على غرار حدث K-T تأثرت الديناصورات بالاصطدام. ولكن الحجة هي أنّ الاصطدام قتل منافسي الديناصورات؛ مما أدّى إلى زيادة تنوّع الحيوانات وأحجامها. وبخلاف السرية التي تكتنف عمل العالمة لوان بيكر Luann Becker وطرق التعامل مع الانقراض البرمي، فقد أحضر بول أولسن كل من يهتمّ بمشاهدة حفرياته الحضرية. وكثير من المتخصصين الذين يدرسون الانقراضات الجماعية زاروه في تلك الفترة.

كشفت عينات أولسن عن الإيريديوم، وأثبتت مختبرات متعددة صحةَ نتائجه بخلاف عمل بيكر. ولكنّ اكتشاف الإيريديوم بمفرده ربما لا يدفع بهذا العمل إلى مستوى مجلة ساينس Science الرائدة المرموقة للنشر العلمي. وقام أولسن وزملاؤه بتوثيق نسق آخر من الأدلة المختلفة كلياً من صخور نيوجرسي؛ بروزات عديدة يساوي عمرها تلك التي أسفرت عن الإيريديوم. وكان أولسن وطاقمه قد لاحظوا وجود تغيّر مهم يمكن رؤيته في آثار الأقدام، وهو زيادة في عدد وحجم آثار الأقدام الجميلة ذات الأصابع الثلاث، وهي معروفة بالنسبة إلى سكان هذه المنطقة منذ أكثر من قرنين، إضافة إلى تنوع أشكالها.

وقد يعتقد المرء أن الطبقات المترسبة بعد الانقراض الجماعي الترياسي الجوراسي T-J ستكون أقل عدداً (لقلة عدد الحيوانات) وأقل تنوّعاً (تنوع الأنواع أقل) وأصغر حجماً، لأن الدرس الوحيد الذي تعلّمناه من الكويكب الذي سبّب انقراض K-T أنه كان مميتاً للحيوانات الأكبر حجماً على نحو غير متناسب. وبينما لم يوجد أيُّ ديناصور أو أيُّ نوع من الأنواع العديدة للزواحف والزواحف الشبيهة بالثدييات يكافئ في حجمه أكبرَ الديناصورات التي انقرضت في نهاية الطباشيري، كان العديد منها بحجم الديناصورات التي انقرضت بسبب كويكب K-T. ومن ثمّ، فمن المتوقَّع أن تكون آثار الأقدام في الجوراسي الباكر أقل عدداً وأصغر حجماً إذا كان الاصطدام هو الذي أنهى العصر الترياسي. وقد لوحظ خلافُ ذلك تماماً في خطوط الأدلة الثلاثة: إذ وُجد عدد أكبر من آثار الأقدام، تعود إلى عدد أكبر من

الأنواع المختلفة، والعديد منها كان أكبر حجماً أكبر بكثير من أكبر آثار الأقدام في الترياسي. وكانت هذه الأدلة إلى جانب اكتشاف الإيريديوم، هي التي أقنعت مجلة ساينس بكون هذا المقال البحثي مهماً بما يكفي لنشره.

وعلى غرار عمل لوان بيكر في السنة التي سبقت منشور أولسن، دُقِّق مقال أولسن وزملائه في مجلة ساينس[10] ومُحِّصت بالتفصيل. ويرى الخبيران في تقييم ترسبات الاصطدام، فرانك كايت Frank Kyte من جامعة كاليفورنيا في لوس أنجلوس UCLA وديفيد كرينغ David Kring من أريزونا أن اكتشاف الإيريديوم يدل بالكاد على الاصطدام في ذلك الوقت؛ وأشار كلاهما إلى أن كمية الإيريديوم التي بلغت عند مجموعة أولسن في المواقع المختلفة أدنى بمرتبة عشرية على الأقل من تلك التي أُحصيت فعلياً في أي موقع K-T حدودي. شيء ما وقع على كوكب الأرض، هذا صحيح لكنه كان صغيراً وعلى الأرجح صغيراً جداً ليتسبب بهذا القدر من الانقراض في نهاية الترياسي. وهكذا، وبينما كانت الأدلة على الاصطدام في نهاية الترياسي أكثر قابلية للتصديق من نهاية البرمي، لا يزال من الصعب أن نصدق بناءً على هذه الأدلة الجديدة أن الانقراض الترياسي كان بسبب اصطدام شبيه بحدث K-T.

توجد فعلاً فوهة كبيرة في كيبيك، وهي إحدى أكبر الفوهات المشاهدة على كوكب الأرض، تسمى فوهة مانيكواغان- ويبلغ قطرها نحو مئة كيلومتر (مقارنة بفوهة تشيكشولوب التي يتراوح قطرها بين 180 و 200 كيلومتر). ولطالما اعتُقد أن عمرها مناسب أيضاً، ويقارب 210 ملايين سنة، أي بعمر الحدود الترياسية الجوراسية تقريباً. وأشارت قياسات التحلل الإشعاعي إلى أن العصر الترياسي بلغ نهايته منذ نحو 199 مليون سنة، وفي عام 2005 تغيّر هذا التاريخ قليلاً لتكون نهاية الترياسي منذ نحو 201 مليون سنة، ولم تكن الحدود الترياسية الجوراسية أصغر سناً فقط بل صارت فوهة مانيكواغان أكبر عمراً، وبتاريخ أفضل تعودُ الفوهةُ إلى 214 مليون سنة مضت.

ضمّ عملنا في جزر الملكة شارلوت لاستكشاف الانقراض الترياسي الجوراسي والبحث أيضاً عن أي انقراض أحفوري محتمل في وقت سابق للانقراض في الصخور التي أرّخنا عمرها بنحو 214 مليون سنة. وتكهّنت تقديراتُ منحنى القتل من أواخر القرن العشرين بأنّ أيّ اصطدام يترك فوهة بحجم فوهة مانيكواغان يبيد بسهولة بين ربع ونصف الأنواع الموجودة على الأرض، لكننا لم نجد شيئاً من هذا! هل يُحتمل أننا بالغنا في تقييم معدّل الإبادة الناتج من آثار اصطدام الكويكبات؟

الظلام الترياسي

بحلول السنوات الأولى من القرن الجديد قام عالم الجيوكيمياء من جامعة ييل روبرت بيرنر Robert Berner بتحسينات عظيمة على نماذجه الحاسوبية المعقدة التي تقدّر كمية الأكسجين وثاني أكسيد الكربون في أيّ مجال زمني يبلغ عشرة ملايين سنة خلال 560 مليون سنة الماضية، وأظهرت نتائجه تطابقاً مذهلاً بين أوقات تراكيز الأكسجين الأدنى أو تراكيزه الأسرع هبوطاً وبين أحداث الانقراضات الجماعية.

وكلّ حدث من أحداث الانقراض الجماعي الثلاثة - ذات الأسباب المُحيِّرة- يظهر طبقات تشير إلى حدوث ترسّبات للطبقات في شروط قليلة الأكسجين.[11] وفي ظل ظروف مماثلة تتحول الطبقاتُ عادة إلى اللون الأسود (لاحتوائها على معدن البيريت وغيره من مركّبات الكبريت التي يقال إنها اختزلت لأنها نتجت من تفاعلات كيميائية لا يمكن أن تحدث إلا بغياب الأكسجين). ويأتي دليل آخر من حقيقةِ مفادها أنّ الصخور التي تعود إلى هذه الأزمنة، المتموضعة بهيئة شرائح رقيقة أو حتى صفائح منفردة، أظهرت بنى رسوبية رقيقة ضمن طبقاتها. ولما كانت العديد من الحيوانات تحفر جحوراً، فإنّ معظم الطبقات المترسبة في البحر منذ الكامبري محروثة حيوياً من قبل العدد الضخم من اللافقاريات التي تلتهم الرواسب في أعماق المسطحات المائية لاستخراج أي مادة عضوية. ولا يمكن أن توجد الطبقات القاعدية Bedding الرقيقة إلا في البيئات التي تغيب أو تندر فيها الحيوانات. وكان واضحاً من خلال هذه المسارات الثلاثة، أي النمذجة الرياضياتية والمعادن الصخرية (التي تُملي لونها) والطبقات الرسوبية، أن الانقراضات في البرمي والترياسي والطباشيري قد حدثت في عالم قليل الأكسجين.

وأظهرت الأدلة المكتشَفة في أواخر تسعينات القرن الماضي وأوائل القرن الحالي أنه عندما كان الأكسجين منخفضاً على الأغلب، كان مكوّن آخر للغلاف الجوي للأرض مرتفعاً في الوقت ذاته، وهو ثاني أكسيد الكربون. وعلى غرار الأدلة على انخفاض الأكسجين، تأتي الأدلة على ارتفاع ثاني أكسيد الكربون من نماذج بيرنر إضافة إلى الأدلة المحفوظة في السجل الصخري، أو بشكل أدقّ في السجل الأحفوري في هذه الحالة. وللأسف، لا توجد وسيلة تمكننا من القياس الفعلي الدقيق لحجم ثاني أكسيد الكربون الذي وُجد في أيّ وقت مضى. إن غاز ثاني أكسيد الكربون لا يلوّن الصخور ولا يؤثر في الطبقات القاعدية، ولكنه نتج من بعض الأعمال الماهرة على أحافير الأوراق تقدّم معرفي مهم سمح بالقياس النسبي لثاني أكسيد الكربون.

وباستخدام هذه الطريقة، على سبيل المثال، يمكن لعالم النباتات القديمة أن يحدِّد ما إذا كانت تراكيز ثاني أكسيد الكربون ترتفع أم تنخفض أم تبقى دون تغير خلال فترات زمنية تمتد إلى مليون سنة. وإضافة إلى ذلك، سمحت هذه الطريقة بوضع تقديرات للمضاعفات العددية لارتفاع تراكيز ثاني أكسيد الكربون وانخفاضه بالنسبة إلى تركيز قاعدي مرصود.

وتبيَّن أن قياس تراكيز ثاني أكسيد الكربون هو إجراء سهل وذكيّ في الوقت نفسه، وكثيراً ما أسفر عن تقدمات معرفية رائعة. فقد أجرى علماء النباتات الذين يدرسون أوراق النباتات الحديثة تجارب تربية أنواع نباتية في نُظم مغلقة يمكن فيها التحكم في رفع أو خفض تراكيز ثاني أكسيد الكربون بالنسبة إلى تراكيزه في الغلاف الجوي (وكانت نحو 360 جزءاً في المليون عندما بدأت هذه التجارب للمرة الأولى). وتبيّن أن النباتات حساسة بشدة لتراكيز ثاني أكسيد الكربون، فحتى التراكيز الصغيرة لثاني أكسيد الكربون الجوي يجب أن تشكّل مصدرَ الكربون بالنسبة إليها، وهو حجر البناء الأساسي في الحياة. وتحصل عليه بشكل أساسي بواسطة أوراقها من خلال بوابات دقيقة تنفتح على الخارج وتُدعى مسامات Stomata. وعندما تنمو النباتات في تراكيز مرتفعة من ثاني أكسيد الكربون؛ فإنها تنتج عدداً قليلاً من المسامات، إذ إن بضعاً منها يكفي في التراكيز المرتفعة منه. وبعد ذلك انتقل الباحث بلهفة إلى السجلّ الأحفوري؛ إذ يمكن مشاهدة مسامات الأوراق بسهولة في أحافير الأوراق، وأثبِتَت هذه النتائج التي توصل إليها بوب بيرنر Bob Berner في نموذجه.

من نهاية البرمي وخلال الترياسي الباكر كانت هناك مسامات قليلة فقط في أحافير الأوراق. وكان ثاني أكسيد الكربون مرتفعاً على نحو مذهل في الأوقات الثلاثة. وأكثر من ذلك، لم يكن مرتفعاً فحسب بل الارتفاع كان سريعا أيضاً، في غضون آلاف السنين وليس ملايين السنين.

تعطينا هاتان النتيجتان تصوراً جديداً تماماً عن الانقراضات الجماعية. فقد حدث كلّ منها في عالَم دافئ بسرعة بفعل ارتفاع قصيرِ الأمد لثاني أكسيد الكربون (وربما الميثان أيضاً بناء على مجموعة أخرى من الأدلة). وفضلاً عن كونه حاراً؛ كان منخفضَ الأكسجين أيضاً. فقد تزامنت الشروط المتمثلة بارتفاع درجات الحرارة وانخفاض الأكسجين مع حدوث انقراض جماعي كبير. أما البيوت الزجاجية في يومنا هذا؛ فهي أمكنة ليست بمنخفضة الأكسجين (بل العكس تماماً بفضل البناء الضوئي) إلا أنها تسخُن بسرعة جراء خصائص الدفيئة من الألواح الزجاجية التي تغطي كامل بنيتها، حيث ينفذ ضوء الشمس عبر زجاج

النوافذ، لكنه عندما ينعكس على هيئة أمواج ضوئية وحرارة، فإن الألواحَ الزجاجية تحجز الطاقة التي تقوم بدورها بتدفئة الهواء، تماماً كما تفعل جزيئات ثاني أكسيد الكربون والميثان وبخار الماء.

تُعدّ الحرارة خطراً على أيّ حيوان؛ فأقصى درجة حرارة يستطيع أيُّ حيوان أن يتحملها هي أقل من نصف درجة حرارة غليان الماء. وتموت معظم الحيوانات عند درجة حرارة قدرها أربعين سيليزية بينما يموت آخِر الصامدين عند الدرجة 45 سيليزية. وهذا معروف من الحالات المفجعة العديدة حين يُترك الأطفال داخل السيارات في الأيام المشمسة، فالتسخين السريع قد يكون قاتلاً. ويتضافر الجانبان المكونان لهذا النظام الفيسيولوجي- كمية الأكسجين المتاحة وكمية الطاقة الحرارية- لجعل الظروف أكثر إماتة: الحيوانات تحتاج إلى أكسجين أكثر مع ارتفاع الحرارة.

ومن بين الانقراضات الثلاثة نجد أن البيانات المتعلقة بارتفاع ثاني أكسيد الكربون الترياسي الجوراسي تحديداً مذهلة. وبينت عالمةُ النباتات القديمة جيني ماك إلوين Jenny McElwain، من جامعة شيكاغو، والتي جمعت في السنوات الأخيرة من القرن العشرين الصخور من البروزات المتجمدة الخطرة وسط جليد غرينلاند، أن نهاية الترياسي نجمت دون شك عن ارتفاع ثاني أكسيد الكربون في عالم منخفضِ الأكسجين أصلاً.

أكثر فأكثر، صار الترياسي يبدو حدثاً يشبه حدث انقراض K-T الذي كانت فيه الانقراضات مباغتة ومنتشرة في كل المجموعات النباتية والحيوانية. وبدا كما لو أنَّ أحداً لم «يَرَه» قادماً بالمعنى الإيكولوجي والتطوري. أما في نهاية الترياسي، ومن جهة أخرى؛ فقد خضعت كلُّ مجموعة -باستثناء الديناصورات سحليَّات الورك Saurischian dinosaurs- لتصغير الحجم (أو في أحسن الأحوال الاحتفاض بقدر مماثل من التنوّع تقريباً) في الفترات الزمنية التي أفضت إلى الانقراض الجماعي الترياسي الجوراسي وما بعده، كما لو أنها علمت بأن أوقاتاً صعبة قادمة في الطريق وأنّ الحجم الصغير سيكون أكثر ملاءمة.

وكانت المجموعات ذات الرئات الأبسط (البرمائيات والزواحف باكرة التطور) الأسوأ حالا، كما انقرضت تماما مجموعات كانت ناجحة جداً في وقت باكر من الترياسي، مثل الفيتوصورات. و على الأرجح كانت للبرمائيات والأركوصوريات الشكل رئاتٌ بسيطة جداً تُنفخ بالعضلات الضلعية فقط، في حين كانت الثدييات والثيرابسيدات الأكثر تقدّماً في ذلك الوقت أفضل حالا، إذ كانت لها على الأرجح رئات تُنفخ بالحجاب حاجز. أما التماسيح التي

يكون ذلك لها منخفضات بطريقة فكل أحواضها سويّاً. ويمكن أن يفسر نجاح سحليات الورك في عوامل متعددة (الحصول على الطعام وتحمل الحرارة وتفادي المفترسين والنجاح التكاثري)، لكن استنتاجنا نحن هو أن هذه المجموعة تطورت بامتلاكها رئة مقسمة بحواجز إلى أقسام كثيرة Septate lung (أي رئة ذات طيات Flaps وظيفة متعددة لزيادة السطح) تكفي أكثر كفاءة من رئات أي سلالة أخرى. فأعطى هذا الجهاز التنفسي مزايا تنافسية كبيرة في العالم الذي ساد قبل وبعد الانقراض الجماعي الترياسي الجوراسي الذي انخفض فيه الأكسجين بشدة. وفي هذا السيناريو استولت سحليات الورك على الأرض في نهاية الترياسي وحافظت على هيمنتها في الجوراسي بفضل مستويات نشاطها الأفضل.

نحن نعلم الآن أنه من بين الأشكال العديدة من منخفضات جسم الزواحف العاشة للترياسي الأوسط والمتأخر، فإن الديناصورات سحليات الورك وحدها هي التي تزايد تنوعها مقارنة بأرقام ثابتة أو متناقصة غالباً في المجموعات الأخرى. كما نعلم أن الأكسجين بلغ في الترياسي المتأخر أدنى تركيز له خلال الـ 500 مليون سنة الماضية. فقد عززت شيء ما فرص بقاء سحليات الورك ونجاتها من الانقراض في العالم قليل الأكسجين. وتشير المطرقة الأساسية إلى أن الهبوط المتزايد والبطيء في تراكيز الأكسجين أدى إلى الانقراض الجماعي الترياسي، لكن هذا الانقراض لم يكن فعلاً حدثاً مزدوجاً منفصلاً بمدى زمني يبلغ من ثلاثة إلى سبعة ملايين سنة.

لا توجد على اليابسة إلا بضعة مواقع ذات أحافير وفيرة للفقاريات من تلك الفترة الزمنية. ونحن لا نعلم حقاً نمط انقراض الفقاريات بشكل جيد بخلاف ما نعرفه عن الانقراض البحري، ولا نعلم سرعة اختفاء الضحايا الأبرز للانقراض الجماعي، أي الفيتوصورات والإيتوصورات Aetosaurs وأركوصورات الشكل البدائية وثنائيات الترايلودونت Trilyodonts وغيرها من الحيوانات الكبيرة. لكن بحلول الوقت الذي ظهرت فيه الأنواع الجوراسية المبهجة بوفرة في البحار متحققة وراسما سجلاً غزيراً من التجديد في عصر الجوراسي الباكر، كانت الديناصورات قد سادت على العالم. فما نوع الرئات التي امتلكها عامين شيء يؤكد إلا أمر واحد: كانت للديناصورات رئات وأجهزة تنفس استطاعت التكيف مع أعظم أزمة أكسجين شهدها العالم في تاريخ الحيوانات على الأرض.

ووجهة النظر الجديدة للأمور هي أن سرعة انقراض الديناصورات سحليات الورك كانت أقل من أي مجموعة فقاريات أرضية أخرى بفضل جهاز تنفسي متفوق تماماً، وهو أول جهاز ذي أكياس هوائية. وتزايد أعداد سحليات الورك في زمن هذا الانقراض الجماعي هو السمة الأكثر إثارة للانتباه من أي شيء آخر.

هيمنة الديناصورات في عالم منخفض الأكسجين: ما بين 230-180 مليون سنة مضت

ارتبطت كلمة «الجوراسي» ارتباطاً لا رجعة عنه بالديناصورات وحدائق الديناصورات، ويعود الفضل في ذلك إلى سلسلة أفلام «الحديقة الجوراسية». وفي الواقع يختلف الجوراسي الحقيقي عن المشهد السينمائي المعروض في تلك الأفلام الثلاثة التي ازدادت غباءً مع كل حلقة. فقد كانت هذه الأفلام بنباتات لم تكن قد تطورت بعد في الجوراسي: مغطاة بالبذور Angiosperma أو نباتاتنا المزهرة المألوفة. وفي الواقع يستحيل أن نصف عالماً جوراسياً، لأنه كان عالماً قد تغير مظهره تماماً بين مظهره في الجوراسي الباكر (قبل 201 مليون سنة) إلى شكله الأخير الذي يعود إلى 135 مليون سنة مضت. وكان في بدايته عالماً محطماً، عالماً قادماً مجدداً من انقراض جماعي، عالماً من دون شعاب مرجانية، عالماً كانت فيه الديناصورات لا تزال قليلة في عددها وأنواعها وصغيرة الحجم، عالماً ذا أكسجين منخفض لا تكاد الحشرات تستطيع الطيران فيه، ولم تكن هناك على أي حال كائنات فقارية طائرة تستطيع اصطيادها. غير أن الأمور كان لابد لها من أن تتغير خلال فترة زمنية قصيرة نسبياً (بمقاييس العصور الجيولوجية).

وفي نهاية الجوراسي شاعت حيوانات اليابسة الأكثر ضخامة عبر كل التاريخ: كانت الديناصورات أسياد الخليقة كلها، وظهرت طيور بدائية صغيرة جداً إضافة إلى ثدييات أصغر منها في الأحياء الأرخص إبحاراً في البلدة. في البداية كانت البحار قاحلة إلى درجة سمحت بعودة الستروماتوليت، وكانت الأسماك الكبيرة والحيوانات المفترسة قليلة.

ومع نهايته كانت هناك وفرة عظيمة من أغرب كائنات البحار قاطبة: البليسيوصورات وهي زواحف ذات رقبة طويلة، والإكثيوصورات الشبيهة بالدلافين والأسماك البدائية الرائعة - شبيهة بالسمك أبي منقار والحفش الموجود في أيامنا (كلتاهما لها دروع جسمية غريبة) - تتجمع بين الشعاب المرجانية مترامية الأطراف ومحيط مملوء بغزارة بكل أنماط الأمونيت وأقاربها الأكثر شبهاً بالحبار، ألا وهي البلمنايتات Belemnites. وتباين الأمونيت بكل أشكاله من الأملس إلى المضلع، واختلف في الشكل من اللوالب المستوية

إلى المخاريط الغريبة المقوسة قليلاً في نهاية العصر. واكتشف أضخم أنواع الأمونيت في الصخور الجوراسية، العملاق من فيرني Fernie، في كولومبيا البريطانية الذي كان في عمره يقترب قطره من ثماني أقدام (مترين ونصف) ومن المؤكد أنه كان يزن نحو نصف طن. إلا أن شيئاً عجيباً قد حدث للعلماء الدارسين لعصور ما قبل التاريخ الأكثر تشويقاً، معظمهم يتوفون دون أن يحلّ أحد مكانهم.

إنه من العدل أن يقال إن الجيولوجيا كعلم حديث وجد بالأصل بفضل الجوراسي. فقد كانت الطبقات القاعدية الجوراسية هي التي رُسمت خريطتها للمرة الأولى من قبل وليم «ستراتا» سميث William «Strata» Smith، في أوائل القرن التاسع عشر. وكانت طبقات الجوراسي هي التي بيّنت إمكانية استخدام الأحافير لربط الطبقات الرسوبية بين مواقع مختلفة بعيدة عن بعضها. إنها الأمونيت الآتية من الجوراسي التي زودت داروين Darwin بالأمثلة الأكثر شهرة آنذاك على التغير التطوري. (مراجع هذا العصر موجودة في الفصل 1، وكالعادة يُوصى بأعمال مؤرخ العلوم البريطاني مارتن إس. رودويك Martin S Rudwick).

لقد أبدى العصرُ الجوراسي النمطَ ذاته من الانفجار التطوري قصير الأمد المشترك بين جميع الفترات الزمنية التالية للانقراض، وهي تدعى فترات الانتعاش Recovery periods. وبدأ كلّ منها بتنوع منخفض للناجين من الانقراض الجماعي، وانتهت بعد فترات زمنية مقدارها خمسة إلى عشرة ملايين سنة فقط. ولكن بعد هذا التوعك التالي للانقراض، كان التنوع ينشأ من جديد دائماً. وكانت الحيوانات والنباتات الجديدة مؤلفةً على الدوام من تجمعات أنواع مختلفة إلى حدّ بعيد. وفي معظم الحالات كانت هذه الأنواع قد تطورت حديثاً في أثناء فترات الانتعاش، لكن في بعض الحالات كانت من الأصناف التي عاشت حياةً تعيسة محفوفة بالمخاطر في وقت سابق للانقراض، ثم انفجرت فيما بعد من حيث العدد والنجاح الإيكولوجي في العالم الجديد. ولم يكن الجوراسي الباكر مختلفاً من هذه الناحية، ومن بذور الانتعاش تطور تجمعٌ جديد ضخم من المخلوقات البحرية، تألّف في مجمله من أنواع جديدة من الرخويات والزواحف البحرية وكثير من الأنواع الجديدة للأسماك العظمية. وليست الحيوانات البحرية هي ما يشتهر به الجوراسي (أو العصر الطباشيري التالي). فلم يقم أحد بإنتاج ثلاثة أفلام رائجة ضخمة عن الحياة البحرية مع اسم الجوراسي في عنوانها، فقد أرادت الجماهير ولا تزال تريد شيئاً واحداً فقط.

الديناصورات

لا يمكن كتابة تاريخ الحياة دون التوقف مطولاً عند الديناصورات. ومع ذلك يبدو هذا أسلوباً غير صالح منذ البداية باعتبار الغرض من تأليف هذا الكتاب، وهو أنّ القصص التي نرويها هنا تتميز بعنصر «الجديد». فقد كُتب كثير عن هذه السحالي من عصور ما قبل الطوفان (رأي العصر الفيكتوري بها)، إذ يبدو أنه من المستحيل جلب أي شيء طازج إلى المائدة بحسب مستهل هذا الكتاب. ولذلك كانت مفاجأة سارة أنْ نجد في الحقيقة بأنّ النتائج الجديدة تؤدي إلى اضطراب سجلّ علوم القرن الحادي والعشرين. فعادةً ما تدور أي خلاصة غير تخصصية عن الديناصورات حول ثلاثة مواضيع: ما إذا كانت الديناصورات من ذوات الدم الحار، وكيف تكاثرت وما هو معروف عن سلوك بناء العش، وكيف نفقت في النهاية. ولكن توجد إضافة إلى ذلك أمور أخرى مثيرة للاهتمام، بما في ذلك ربما أكثرها إثارة: لِمَ وجدت الديناصورات في الأصل أو على الأقل لِمَ تطور مخطط جسم الديناصورات؟ وهذا بدوره مرتبط بالسؤال: كيف كانت تتنفس. ومسألة ثانية سننظر فيها هنا مرتبطة بالتنفس بحدّ ذاته: ما هو الجديد في قصة تحول الديناصورات إلى الطيور. ويبدو أنّ جزءاً كبيراً منها يتأتّى عن الاكتشافات الحديثة في الصين (إضافة إلى ذلك هناك الاكتشافات الجديدة في القارة القطبية الجنوبية، التي كان مؤلفا هذا الكتاب شاهدين عليها). وأخيراً، أعطى قرننا الجديدُ معلوماتٍ حول ناحيتين أساسيتين لفيسيولوجيا الديناصورات وجواباً نهائياً عن اللغز الذي طال أمده والمتعلق بما إذا كانت الديناصورات من ذوات الدم الحار، إضافة إلى اكتشافات جديدة حول معدل النمو النموذجي للديناصورات. وهنا أيضاً، أحد الاتجاهات الشائعة المتأتية عن البيانات الحديثة يعود بنا مباشرةً إلى الاختلافات بين الديناصورات والطيور «الحقيقية»، وليست الديناصورات الطائرة فحسب، إنما الأنواع التي تتصف بجميع الخصائص التي نربطها الآن بالطيور.

لماذا وجدت الديناصورات؟

كي نروي تاريخ الديناصورات الجديد، علينا أنْ نعود إلى الوراء في الزمن إلى بضعة ملايين سنة سبقت الانقراض الجماعي الترياسي الجوراسي، وهو الموضوع الذي ينتهي به الفصل الماضي. فقد كانت الديناصورات حقاً هي المسيطرة في الجوراسي والطباشيري. وفي أثناء الترياسي كانت مجرد فقاريّ آخر صغير قليل التنوع والوفرة يحاول البقاء

على قيد الحياة في عالم منخفض الأكسجين. ومع ذلك، مرة تلو المرة، يبدو حقيقةً أنّ الموضوع المسيطر في تاريخ الحياة هو أنّ أوقات الأزمات تعزز الإبداع الجديد. ويبقى التنوع منخفضاً، لكن التباين - أي قياس عدد مخططات الجسم المختلفة، وفي حالة الديناصورات مخططات الجسم وتشاريحه المختلفة جوهرياً - يتزايد تزايداً هائلاً. ويأتي التشبيه من كتاب رائع بقلم توم وولف Tom Wolfe عنوانه الأمور الصحيحة *The Right Stuff*. وفي هذا الكتاب يصف الحوادث المميتة عند طياري الاختبار التي غالباً ما كانت سريعة وعنيفة، وذلك في أواخر خمسينات القرن العشرين عندما طُوِّرت الطائرات النفاثة العملاقة الجديدة. آجلاً أم عاجلاً، كان طيار الاختبار يجد نفسه في طائرة تسقط إلى حتفها. غير أنّ وولف قام بوصف ارتكاس طياريّ الاختبار: الذين يمرون بكل هدوء عبر السير المتتابع - مجرّبين للطريقة A، لا، جرّب الطريقة B، جرّب الطريقة C، جرب ... . وفي العالم الترياسي كان كثير من الكائنات الحية هي هذه الطائرات المتحطمة، التطور هو الطيار الذي يجرّب هذا الشكل ثم شكلاً آخر ثم شكلاً آخر. وإذا استخدمنا هذا التشبيه، فإن الديناصورات التي استطاعت الخروج من حالة سقوط الانهيار الذي تحول إليه البيوسفير الترياسي المتأخر منخفض الأكسجين عن طريق تطوير مجموعة من الرئات الأكثر تعقيداً وفاعليةً والتي شهدها العالم يوماً.

ومنذ نحو 200 مليون سنة، أي بعد خمسين مليون سنة فقط من نوبة الانقراض البرمي، انتهى العصر الترياسي باستنزاف آخر. وكما رأينا في الفصل السابق، من أصل كثير من سلالات حياة اليابسة التي عانت خلال هذا الانقراض، كانت الديناصورات سحليات الورك Saurischian هي وحدها التي تجاوزت الأزمة بسلام. ولم يكن الانقراض الجماعي الذي أنهى العصر الترياسي مجرد ظاهرة على اليابسة، إذ محا أيضاً معظم سلالات رأسيات الأرجل ذات الحجرات Chambered cephalopods. أما وفي الجوراسي الأدنى؛ فإنها تنوعت إلى ثلاث سلالات عظيمة: أشباه المحار، والأمونيت، والغمديات *Coleoids*. وازدهرت شعب السكليراكتينيا مرةً أخرى، واستعمرت أعداد ضخمة من المحار المسطح قاع البحر. ومرةً أخرى عادت الزواحف البحرية المنتمية إلى الإكتيوصور *Ichthyosaur* وسلالات البليسيوصور *Plesiosaur* الجديدة هي اللواحم الرئيسة.

ازدهرت الديناصورات على اليابسة، وتقهقرت الثدييات من حيث الحجم والعدد لتصبح جانباً صغيراً من حيوانات اليابسة، غير أنها أبدت تشعباً نحو كثير من الأشكال الحديثة قرب نهاية الطباشيري. وتطورت الطيور من الديناصورات في الأجزاء الأخيرة من الجوراسي. كل هذا معروف، وليس موضوعاً ينتمي إلى هذا الكتاب الذي يرمي إلى إعادة النظر في تاريخ الحياة، لننظر عوضاً عن ذلك في سجلّ الأكسجين خلال الجوراسي، ونقارنه بأعداد وأنواع الديناصورات في حديقة الجوراسي الغابرة.

نظراً لأهميتها العامة وجوانبها المثيرة نوعاً ما، قد يكون السؤال الأكثر شيوعاً المتعلق بالديناصورات هو كيفية انقراضها. إنّ فرضية عام 1980 التي طرحتها مجموعة ألفاريز Alvarez والتي مفادها أنّ كوكب الأرض قد اصطدم بكويكب منذ 65 مليون سنة، وأنّ الآثار البيئية لذلك الكويكب قد سببت بشكل مفاجئ نسبياً الانقراضَ الجماعي الطباشيري الثالثي، والذي كانت فيه الديناصورات هي الضحايا الأكثر بروزاً، ربما هذه الفرضية التي تجعل من هذا السؤال سؤالا محوريا في أذهان الناس. وهذا الجدال ينشط من جديد كل عدة سنوات مع اكتشاف ما جديد يعيد الموضوع إلى الصدارة. ومن هنا تأتي أهميتها التي تجعل السؤال عما إذا كانت الديناصورات من ذوات الدم الحار سؤالاً ثانوياً. وقرب نهاية قائمة الأسئلة المتعلقة بالديناصورات نجد السؤال المعاكس المتعلق بانقراض الديناصورات، وهو ليس لِمَ اختفت الديناصورات بل لِمَ تطورت أساساً؟ نحن نعرف بالتأكيد متى ظهرت الديناصورات أولاً في الثلث الثاني من العصر الترياسي (قبل نحو 235 مليون سنة)، ونعرف بالتأكيد كيف كان مظهر هذه الديناصورات الباكرة: كان معظمها نسخة مصغرة من الديناصورات اللاحقة والتيرانوصورات ريكس *T-rex* والألوصورات *Allosaurus* الشهيرة. وأشكال ذات القائمتين التي سرعان ما أصبحت ضخمةً. والشيء غير المعروف بوضوح أو غير المأخوذ بعين الاعتبار لدى من يحيط بالأمر هو الفهم الجديد بأنه قبل 230 مليون سنة كان الزمن الذي اقترب فيه الأكسجين من مستواه الأكثر انخفاضاً منذ العصر الكامبري.

لماذا وُجدت الديناصورات؟ يمكن الإجابة الآن عن هذا السؤال بطرق عديدة. فقد وجدت الديناصورات، لأنه كان هناك انقراض جماعي برميٌّ فَتَح الطريق للأشكال الجديدة. ووجِدت الديناصورات، لأن بِنْيات جسمها كانت ناجحةً جداً في ظروف كوكب الأرض في العصر الترياسي. ولكن ربما هذه التعميمات لا تصل إلى لبّ الموضوع. وعالم الأحافير بول سيرينو Paul Sereno من شيكاغو، الذي اكتشف بعضاً من الديناصورات الأكثر قدماً وكان وصولها إلى سيادة الأرض جزءاً رئيساً من دراسته، ينظر إلى ظهور الديناصورات بطريقة أخرى. ففي مراجعته المنشورة في عام 1999 "تطور الديناصورات"، يقول: «إنّ سيادة الديناصورات على الأرض قرب انتهاء الترياسي تبدو الآن بأنها كانت عارضة وانتهازية بقدر ما كان انقراضها واستبدالها بالثدييات الولودة في نهاية الطباشيري عارضاً وانتهازياً.»

ويتابع سيرينو مقترحاً بأنّ التشعب التطوري التالي لتطور الديناصورات الأولى كان بطيئاً وذا تنوع منخفض. وهذا يختلف تماماً عن النموذج العادي المشاهد في التطور عندما ينشأ للمرة الأولى نوع من المخططات الجسمية الناجحة بوضوح: عادةً ما يكون هناك نوع ما من الظهور الانفجاري لكثير من الأنواع الجديدة المستخدمة للشكل الجديد من الإبداع التطوري في فترة قصيرة من الزمن. ولم يكن الأمر كذلك فيما يتعلق بالديناصورات. كما لاحظ سيرينو أيضاً: «تشعب الديناصوري الذي ابتدأ بذوات القائمتين التي يبلغ طولها متراً واحداً، كان أبطأ سرعةً وأكثر تقييداً على النطاق التكيفي مقارنةً بالثدييات الولودة».

بقيت الديناصورات وكذلك فقاريات اليابسة الأخرى لملايين من السنين على تنوع منخفض نسبياً، وهذه نتيجة لا يزال سيرينو وآخرون يرونها محيّرة. ويمكن الآن الإجابة عن هذا السؤال. ويتبيّن من تاريخ الحياة الحيوانية على كوكب الأرض بشكل متكرر توافق بين أكسجين الغلاف الجوي وتنوع الحيوانات إضافة إلى أحجام أجسامها: إذ شهدت أزمنة الأكسجين المنخفض، بشكل وسطي، تنوعاً أقل وأحجام جسم أصغر مقارنة بأزمنة الأكسجين الأكثر ارتفاعاً. ويبدو أنّ هذه العلاقة تنطبق على الديناصورات أيضاً. وكان كتاب من لا شيء *Out of Thin Air* بقلم وورد Ward في عام 2006 المصدر الأول الذي يربط صراحةً بين مخطط الجسم للديناصور والعملقة اللاحقة: مستويات الأكسجين.

إذا كان تنوع الديناصورات معتمداً حقاً على مستويات أكسجين الغلاف الجوي، فإنّ محتوى أكسجين الغلاف الجوي المنخفض جداً في الترياسي المتأخر يفسّر بوضوح الفترة الطويلة للتنوع المنخفض للديناصورات بعد ظهورها الأول في الترياسي.

لقد قتلت أزمنةُ الأكسجين المنخفض الأنواعَ (وفي الوقت نفسه حرضت التجارب على مخططات الجسم الجديدة للتعامل مع الأزمنة العصيبة). ويمكن العثور على ما يدعم هذه الفرضية بمقارنة التقديرات الأخيرة لأكسجين الغلاف الجوي في الترياسي وحتى الطباشيري بالمجموعة الأكثر كمالاً لتنوع الديناصورات خلال الفترة نفسها. وتبيّن هذه المقارنة التي نشرها في عام 2005 الاختصاصي بعلم الأحافير والصخور الرسوبية ديفيد فاستوفيسكي David Fastovsky وزملاؤه أنّ عدد أجناس الديناصورات بقي ثابتاً تقريباً من ظهور الديناصورات الأولى في النصف الأخير من الترياسي وخلال النصف الأول من الجوراسي. ولم تبدأ أعداد الديناصورات بالزيادة بصورة ملموسة حتى الجوراسي المتأخر، وهذه النزعة استمرت حتى نهاية الطباشيري، مع التوقف الوحيد (والخفيف) في هذا الارتفاع في الجزء

الباكر من الطباشيري المتأخر. ومع نهاية الطباشيري، (في العصر الكامباني، قبل ما بين 84 إلى 72 مليون سنة) كانت أعداد الديناصورات أكثر بمئات الأضعاف من أعدادها خلال الترياسي ثم حتى الجوراسي المتأخر. إذن، فما هو سبب هذا الازدياد العظيم؟ توحي العلاقة أنّ مستويات الأكسجين أدت دوراً في التحكم في تنوع الديناصورات. فخلال الترياسي المتأخر والنصف الأول من الجوراسي كانت أعداد الديناصورات ثابتةً ومنخفضةً، وكذلك كان أكسجين الغلاف الجوي مقارنة بقيمه اليوم. وارتفع تركيز الأكسجين تدريجياً في الجوراسي، ضارباً 15 إلى 20 في المئة في الجزء المتأخر من هذا العصر، ولم تبدأ أعداد الديناصورات بالازدياد حقاً إلا وقتذاك. وارتفعت مستويات الأكسجين بثبات خلال الطباشيري، وتزايدت معها أعداد الديناصورات أيضاً، إذ شوهد ارتفاع كبير في أعداد الديناصورات في الطباشيري المتأخر، وكانت أيام العز الحقيقية للديناصورات. وكان الارتفاع المفاجئ للأكسجين في نهاية الجوراسي هو الزمن الذي ازدادت فيه أحجام الديناصورات بالغةً أوجها في أضخم الديناصورات المعروفة التي ظهرت اعتباراً من الجوراسي المتأخر وعبر الطباشيري.

ومن المؤكد أنه كانت هناك أسباب عديدة أخرى لهذه النهضة الطباشيرية. فعلى سبيل المثال، تسبّب ظهور مغطاة البذور Angiosperms في أزمنة الطباشيري الوسطى إلى ثورة للنباتات المزهرة، ومع نهاية العصر الطباشيري كانت النباتات المزهرة قد أزاحت إلى حدّ كبير الصنوبريات Conifers التي كانت مسيطرة في الجوراسي. وأدت نهضة مغطاة البذور إلى خلق المزيد من النباتات وظهور تنوع في الحشرات. وقد توفّر المزيد من الموارد في جميع النظم الإيكولوجية، وقد يكون هذا ما أطلق التنوع أيضاً. ومع ذلك، فإن كلاً من العلاقة بين الأكسجين والتنوع والعلاقة بين الأكسجين وحجم الجسم أدت دوراً مراراً وتكراراً في مجموعات عديدة مختلفة من الحيوانات، من الحشرات إلى الأسماك إلى الزواحف إلى الثدييات. فلماذا لا يكون له دور في الديناصورات أيضاً؟

تطورت الديناصورات في أثناء حضيض الأكسجين (بين 10 و12 في المئة، مكافئاً لارتفاع قدره خمسة عشر ألف قدم، أي أربعة كيلومترات ونصف، في أيامنا) في الترياسي المتأخر أو قبله مباشرة، في وقت كان الأكسجين فيه عند قيمه الدنيا خلال آخر 500 مليون سنة. وقد رأينا بالفعل أنّ كثيراً من الحيوانات الأخرى غيّر مخطط جسمها استجابةً لقيم الأكسجين المتطرفة، وكذلك الأمر بالنسبة إلى الديناصورات أيضاً. ويختلف مخطط جسم الديناصورات جذرياً عن مخططات أجسام الزواحف الباكرة، وظهرت في ظروف الحر القاتل حقاً (وفي ظروف احترار عالمي عظيم) مع هبوط الأكسجين إلى الحضيض.

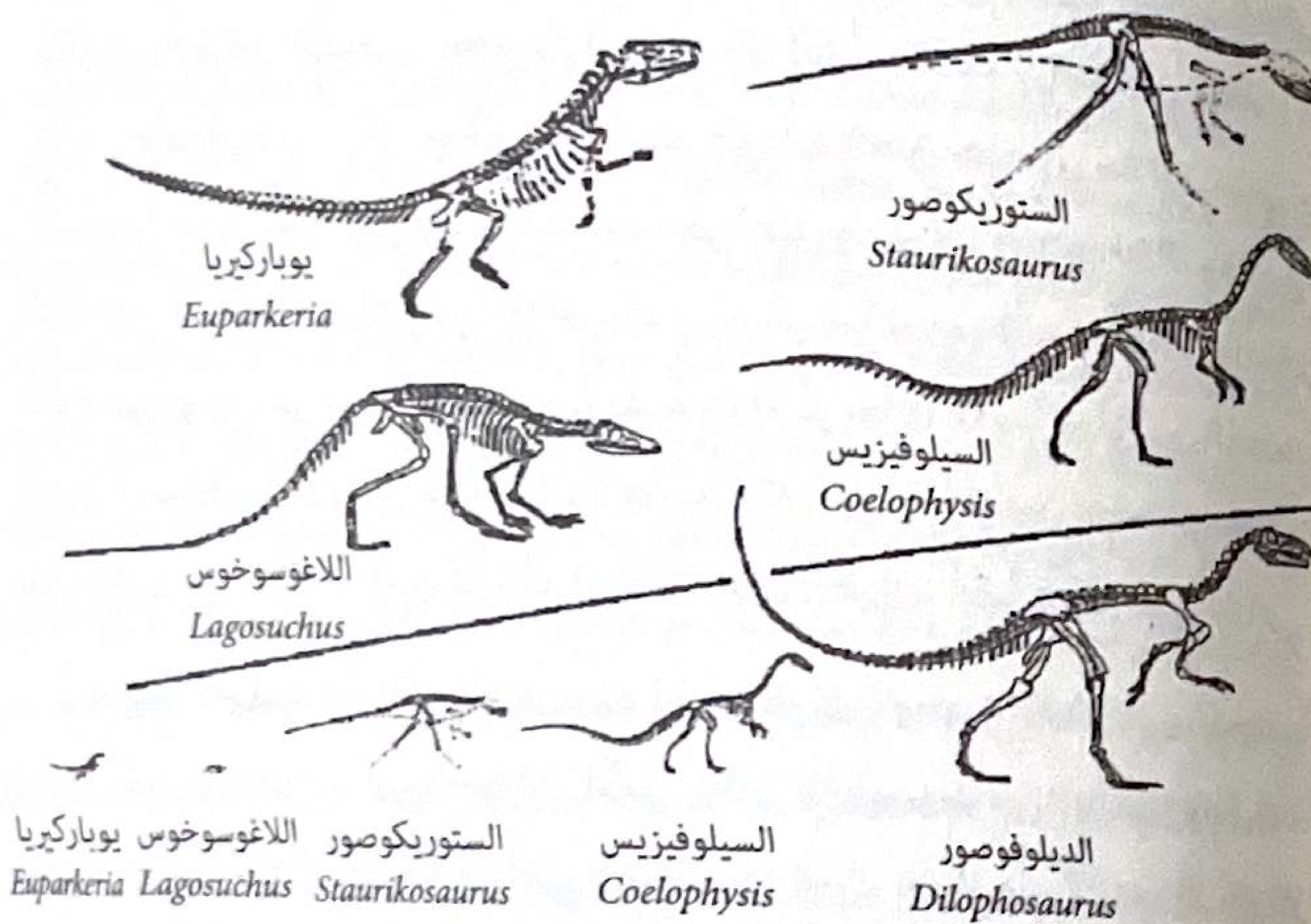
قد تكون هذه مصادفةً، ولكن باعتبار أنه يمكن تفسير كثير من مظاهر «الديناصورية» بكونها تكيفات مع الحياة في ظروف قلة الأكسجين، فاحتمال المصادفة غير مرجح. وكان مخطط جسم الديناصور البدني (تطور بواسطة الديناصورات سحلية الورك الأولى مثل الستوريكوصور *Staurikosaurus* والوحش الشبيه بالديناصور الأصغر سناً منه قليلاً والمسمّى الهيريراصور *Herrerasaurus*) في جزء منه استجابةً لظروف قلة الأكسجين في ذلك الوقت، وعليه يمكن الاستنتاج أنّ مخطط جسم الديناصور البدئي المبني على المشي على قائمتين تطور استجابةً لقلة الأكسجين في الترياسي الأوسط. ومع الوضعية ذات القائمتين تغلبت الديناصورات الأولى على التحديدات التنفسية المفروضة عليها بواسطة تقييد كارير Carrier's constraint. وبذلك أدى حضيض الأكسجين في الترياسي إلى بدء نشأة الديناصورات من خلال تشكل مخطط الجسم الجديد هذا.

ولا تُدرك أبداً تبعات أن تعيش في عالم لا توجد فيه إلا عشرة في المئة من الأكسجين عند مستوى سطح البحر، كما كان خلال العشرين مليون سنة الأخيرة من الترياسي. وذلك هو مستوى الأكسجين الموجود على قمة جبل رينيير Mount Rainier في ولاية واشنطن. إنها كمية الأكسجين الموجودة في أعالي براكين هاواي الأكثر ارتفاعاً، حيث يوجد مرصد كيك Keck العملاق الذي يراقب الفضاء، مكان يعلم فيه علماء الفلك سريعاً ما يتعلق بنقص الطاقة ونقص الحدة الذهنية الناتجيْن من مستويات الأكسجين المنخفضة إلى هذه الدرجة. إنّ مبدأ الوتيرة الواحدة لا يصلح في هذا المجال، لأنّ استخدام المرتفعات العالية بقصد الفهم الأفضل لمستويات الأكسجين الناقصة لا يصلح في كثير من المستويات، ففي المرتفعات لا يقتصر انخفاض التركيز على الأكسجين وحده، بل تنخفض تراكيز جميع الغازات أيضاً. وأحد هذه الغازات هو بخار الماء، ولهذا الغاز تأثير عظيم في بيوض الطيور في المرتفعات. ولكن لابدّ أن تكون قد حدثت تكيفات عظمى مع أكسجين بهذا الانخفاض، وقد يكون انخفاض الأكسجين هو التقييد الأكثر أهمية لتطور حيوانات اليابسة في هذا الوقت. وبالفعل كانت هذه التكيفات موجودة. وأحد هذه التكيفات أسميناه «الديناصور»، وصارت الديناصورات الأولى وكانت كلها ذات قائمتين وذات نوع جديد من الرئات والتنفس، وصارت أكثر حيوانات اليابسة كفاءةً في كل الأزمنة في الظروف منخفضة الأكسجين. ولا تزال الناجية منها، المخلوقات التي نسميها طيوراً، تحتفظ بهذا الامتياز.

ويظهر سجلّ الأحافير أنّ أبكر الديناصورات الحقيقية كانت ذات قائمتين وتطورت من أركوصوريات الشكل ذات القائمتين الأكثر بدائيةً في وقت أبكر بقليل في الترياسي.

كانت أركوصوريات الشكل هذه أسلاف السلالات التي أدت إلى ظهور التماسيح كذلك، وربما كانت من ذوات الدم الحار أو متجهة نحو ذاك الاتجاه. إننا نرى المشي على قائمتين كمخطط جسم متكرر في هذه المجموعة، حتى إنه كانت هناك تماسيح ذات قائمتين في الماضي، فما الفائدة من المشي على قائمتين، وكيف كان من الممكن أن تكون تكيفاً مع أكسجين منخفض؟

حتى إنّ سحالي العصر الحديث لا تستطيع التنفس وهي تركض (وكانت لديها مئات الملايين من السنين لتصويب هذا العيب)، ويعود هذا إلى مشيتها المتمددة Sprawling gait. وتبدي ثدييات العصر الحديث نظماً مميزاً بواسطة مزامنة الشهيق مع حركة الأطراف. وتأخذ الخيل والأرانب البرية والفهود (من بين كثير من الثدييات الأخرى) نفساً واحداً لكل خطوة. وتتموضّع أطرافها مباشرة تحت كتلة الجسم، ولأجل السماح بهذا، فقد تصلب العمود الفقري بشكل شديد في هذه الثدييات رباعيات الحركة مقارنة بالعمود الفقري في الزواحف ذات المشية المتمددة. ويتقوّس العمود الفقري في الثدييات قليلاً ثم يستقيم مع الجري، ويتناغم هذا التقوس الخفيف نحو الأعلى والأسفل مع الشهيق والزفير. غير أنّ هذا النظام لم يظهر إلا بعد ظهور الثدييات الحقيقية، في الترياسي. حتى إنّ السينودونت (كلبيات الأسنان) *Cynodonts* الأكثر تقدماً في الترياسي، لم تكن منتصبةً بشكل كامل، لذلك فإنها كانت ستعاني نوعاً ما لدى محاولتها الجري والتنفس.



إذا جرى مخلوق ما على ساقين بدلاً من أربع سيقان، لا تتأثر الرئتان أو القفص الصدري. ويمكن فصل التنفس عن الحركة، حيث تستطيع ذوات القائمتين أن تتنفس بقدر ما تحتاج خلال مطاردة بسرعة عالية. ومن المؤكد أنه في زمن الأكسجين المنخفض وكثرة الحيوانات المفترسة، فإنّ أي منفعة خفيفة سواء كانت في مطاردة فريسة أم الهروب من حيوان مفترس - حتى من حيث مقدار الوقت المطلوب للبحث عن غذاء أو في كيفية البحث عنه - كانت من المؤكد أنها ستزيد فرص النجاة. وقد كانت الحيوانات المفترسة المتمددة في البرمي المتأخر، مثل الغورغونوبسيات المخيفة، مثلها مثل معظم الحيوانات المفترسة الموجودة في زمنها أو قبله، تكمن لفريستها كما هي حال السحالي في أيامنا. وتتطلب الحيوانات المفترسة التي تبحث عن الفرائس سرعة مرتفعة وطاقة احتمال. إذن، كيف كان الأمر بالنسبة إلى حيوانات الترياسي عندما اكتشفت للمرة الأولى أن الحيوانات المفترسة صارت تبحث عنها بدلاً من أن تكمن لها بانتظارها؟

وفي الترياسي، كان لسلالة التماسيح وسلالة الديناصورات سلف مشترك رباعي الحركة. وقد يكون هذا الوحش من زواحف جنوب إفريقيا اسمه يوباركيريا *Euparkeria* وتُسمّى هذه المجموعة علمياً طيريات العنق *Ornithodira*، وقبل أفرادها الباكرة بدأت هذه المجموعة بالتطور نحو المشي على قائمتين. ويتبيّن ذلك من عظام الكاحل لديها التي صارت أبسط متحولة إلى مفصل رَزّي Hinge joint بسيط ابتداءً من جهاز أكثر تعقيداً كان موجوداً لدى رباعيات الحركة. إنّ ترافق هذا مع تطاول الطرفين الخلفيين مقارنة بالطرفين الأماميين يعتبر دليلاً على ذلك أيضاً، وكذلك الرقبة التي تتطاول مع تقوّس طفيف على شكل حرف S. وتنقسم طيريات العنق هذه إلى سلالتين متميزتين، إحداهما توجه نحو الطيران. وكانت هذه هي البتيروصورات *Pterosaurs*، وقد يكون أحد طيريات العنق في الترياسي المتأخر، الذي يُسمّى سكليروموخلوس *Scleromochlus*، الأول من نوعه، هو شكلاً برياً منتصباً يشبه عداء سريعاً وربما بدأ يحلّق بين الخطوات الطويلة مستخدماً الذراعين مع الطيات الجلدية. وكان اليوديمورفودون *Eudimorphodon* هو البتيروصور الأقدم الذي لا شكّ في قدرته على الطيران، أيضاً في الترياسي المتأخر.

وبينما اتجهت طيريات العنق هذه نحو الطيران، توجهت أخت هذه المجموعة البرية نحو مورفولوجيا الديناصورات الأولى. وكان اللاغوسوخوس *Lagosuchus* شكلاً انتقالياً بين عداء ثنائي الحركة ورباعي الحركة. ربما تحرك بطيئاً على الأربع، إلا أنه كان ينتصب على قائمتيه الخلفيتين من أجل الانقضاض السريع، الانقضاض الضروري للإمساك

بالفريسة، إذ إنه كان حيواناً مفترساً. إلا أن طرفيه الأماميين ويديه لم تكتسب بعد نمط مورفولوجيا الديناصورات، لذلك لا يصنّف مع الديناصورات. أما خليفته الهيريراصور *Herrerasaurus* من الترياسي؛ فيحقق كل المتطلبات وهو مصنف كديناصور - الأول بينها. وكما سنرى في الصفحات المقبلة، فربما افتقد خاصيةً واحدةً سيقوم سليله المباشر بتصويبها: نوعاً جديداً من الجهاز التنفسي الذي يستطيع التعامل مع محتوى الأكسجين الآخذ بالانخفاض بثبات في الغلاف الجوي للكرة الأرضية.

كان الديناصور الأول ثنائي الحركة (يمشي على قدمين) Bipedal بشكل كامل،[1] وكان يستطيع إمساك الأشياء بيديه، إذ كان له إبهام مثلنا. وكانت هذه اليد ذات الأصابع الخمسة تتميز وظيفياً عن القدم ثلاثية الأصابع (كانت فيها خمسة أصابع فعلية، لكنّ اثنين منها كانا أثريين لدرجة أنّ ثلاثة أصابع منها فقط كانت تلامس الأرض في أثناء الجري أو المشي). وباعتبار أنها كانت ثنائية الحركة كلياً، لم يكن للتطور أنْ يقلق بشأن الاحتفاظ باليد التي يجب أن تلامس الأرض من أجل التحرك. إذن، ما دام هناك طرف حرّ لم يعد ضروري للتحرك، فماذا كانت ستفعل به؟ قام التيرانوصور ريكس *T-rex* الأكثر تأخراً والأكثر شهرةً بخفض حجم الساعد لدرجة أنّ بعضهم قد طرح فكرة أنه لم يكن وظيفياً. ولكنّ الأمر لم يكن كذلك بالنسبة إلى هذه الديناصورات الأولى. فبينما كانت وضعيتها كوضعية الديناصورات آكلة اللحوم المتأخرة التي نألفها كثيراً، فمن الواضح أن أيديها كانت مستَخدَمَة - ربما للإمساك بالفريسة في أثناء جريها.

إذن، هذا هو مخطط جسم الديناصورات الأولى التي تطور منها جميع الديناصورات الباقية، فكانت ذات قائمتين ورقبة متطاولة ويدين قادرتين على الإمساك ذات إبهام وظيفي وحوض ضخم مميز لأجل العضلات الضخمة ومساحة السطح الكبيرة الضرورية لهذه العضلات المستخدمة في المشي والجري. وكانت ذوات القائمتين الباكرة هذه صغيرةً نسبياً، وقبل نهاية الترياسي انقسمت ثانيةً إلى مجموعتين، وبقي الانقسام الأكثر جوهرية في جميع الديناصورات. وأحد أنواع ديناصورات الترياسي ثنائية الحركة هذه عدل عظام الورك لديه ليجسّد عظم عانة منعطفاً نحو الخلف مقابل عظم العانة الموجه إلى الأمام في الديناصورات الأولى. وكما يعلم أي تلميذ مدرسة، يسمّى هذا التغير في بنية الحوض انقسام الديناصورات بأنه مجموعتان كبيرتان: سحليات الورك السلفية وسلالة طيريات العنق المشتقة منها واللتين ستتشاركان في السيادة على العالم خلال نحو 170 مليون سنة مقبلة.

وطبعاً ما يثير الاهتمام هنا هو كيف تنفّست الديناصورات.[2] فقد اكتشف أنّ جهازها التنفسي كان مختلفاً جداً عن الزواحف ذات الدم البارد التي نجدها في هذه الأيام، ولكنه يشبه كثيراً الجهاز التنفسي لدى الطيور ذات الدم الحار. إنّ رئتي سلويات العصر الحديث (الزواحف والطيور والثدييات) ذات نوعين رئيسين (على الرغم من أننا سنرى أنّ هناك أكثر من جهازين تنفسيين، يتضمنان الرئتين والجهاز الدوري Circulatory system ونمط صبغة الدم). يمكن لكلا نمطي الرئة أن تُشتقان على نحو معقول من نوع واحد من سلف الزواحف الكربونية Carboniferous reptiles التي كانت لها رئات بسيطة شبيهة بالحويصلات. ولجميع الثدييات الموجودة رئات حويصلية Alveolar lungs، في حين أنّ للسلاحف والسحالي والطيور والتماسيح الموجودة - وكل الباقي - رئات مقسّمة بحواجز Sepate lungs. وتتألف الرئات الحويصلية من ملايين الحويصلات الكروية تُغذّيها شبكة أوعية كثيفة تُسمّى الحويصلات. ويتدفق الهواء إلى الحويصلات ومنها، وهكذا فإنها ثنائية الاتجاه.

نحن - الثدييات - نستخدم هذا الجهاز، وتنفسنا المألوف - إلى الداخل، إلى الخارج، إلى الداخل، إلى الخارج - نموذجي تماماً. ويجب أنْ يُسحب هواؤنا إلى داخل هذه الحويصلات، ثم يُزفر بعد تبادل الأكسجين وثاني أكسيد الكربون. ونقوم بذلك بواسطة الدمج بين تمدد القفص الصدري (بالطبع المستمدة قوته من العضلات) وتقلص مجموعة كبيرة من العضلات والتي تسمّى بمجموعها الحجاب الحاجز. وعلى النقيض من ذلك نوعاً ما، يسبّب انقباض الحجاب الحاجز زيادة في حجم الرئتين. وتؤدي هاتان الفعاليتان - تفاعل تمدد الأضلاع مع انقباض الحجاب الحاجز - إلى خفض ضغط الهواء ضمن حجم الرئة؛ ما يجعل الهواء يتدفق نحو الداخل. ويتحقق الزفير جزئياً بواسطة الارتداد المرن الخاص بالحويصلة الرئوية المنفردة: عندما تنتفخ الحويصلات فإنها تتضخم، وسريعاً بعد ذلك تتقلص بشكل طبيعي بسبب الخصائص المرنة لنسيجها. وتسمح الحويصلات الكثيرة المستخدَمة في هذا النوع من الرئة بخلق نظام اكتساب فعال للأكسجين، نحتاج إليه بشدة نحن الثدييات من ذوات الدم الحار للاحتفاظ بأنماط حياتنا الفعالة والغنية بالحركة. ولكن، لمّا كان الهواء يمرّ نحو الداخل ونحو الخارج عبر الأنبوب نفسه، فالعملية غير فعالة وهي تؤدي إلى خفض امتصاص الأكسجين مقارنة بالطاقة المستهلكة للحصول عليه.[3]

وعلى النقيض من رئة الثدييات، فإن الرئة المقسّمة بحواجز الموجودة لدى الزواحف والطيور تشبه حويصلة واحدة عملاقة ولأجل تقسيمها إلى جيوب أصغر حجماً بهدف

زيادة مساحة سطح التبادل التنفسي، يمتدّ عدد كبير من رقائق نسيج شبيهة بالنصل إلى داخل الحويصلة. وهذه العناصر الفاصلة هي الحواجز، وهي ما يعطي هذا النوع من الرئات اسمها. وهناك أنواع مختلفة كثيرة مستندة إلى هذا التصميم الأساسي للرئة لدى الأنواع العديدة المختلفة من الحيوانات التي تستخدمها. وتنفصل بعض أنواع الرئات المقسّمة بحواجز إلى حجرات صغيرة، وبعضها لها حويصلات ثانوية متموضعة خارج الرئة لكنها متصلة بها بواسطة أنابيب. وكما هي الحال في الرئة الحويصلية، فإن تدفق الهواء ثنائي الاتجاه في معظمها - ولكن ليس في جميعها، كما اكتشف مؤخراً، واستثناءات هذه القاعدة المكتشفة مؤخراً لم تغير بشكل كبير فهمنا للبيولوجيا القديمة المتعلقة بالزواحف الباكرة فحسب، بل غيّرت أيضاً فهمنا لمصيرها في الانقراض الجماعي البرمي.

الرئات المقسّمة بحواجز غير مرنة ومن ثمّ لا تتقلص بشكل طبيعي بعد الشهيق. كما تختلف تهوية الرئة عبر المجموعات التي لديها رئات مقسّمة بحواجز. وتستخدم السحالي والأفاعي حركة الأضلاع لسحب الهواء نحو الداخل، ولكن كما رأينا، فإنّ تحرك السحالي يثبط التمدد التام في التجويف الرئوي، ولذلك لا تتنفس السحالي في أثناء حركتها.

إنّ شتى التعديلات التي طرأت على الرئة المقسّمة بحواجز تجعل هذا الجهاز أكثر تنوّعاً مقارنةً بالجهاز السنخي. فعلى سبيل المثال، للتماسيح رئة مقسّمة بحواجز وحجاب حاجز معاً - والحجاب الحاجز غير موجود في الأفاعي أو السحالي أو الطيور. غير أنّ الحجاب الحاجز في التماسيح يختلف نوعاً ما عن ذلك الموجود لدى الثدييات: إنه غير عضلي لكنه مرتبط بالكبد، وتعمل حركة هذا الحجاب الحاجز الكبدي كمكبس لنفخ الرئتين، بواسطة عضلات مرتبطة بالحوض. ويعمل الحجاب الحاجز في الثدييات (بما فيها الإنسان) على سحب الكبد مثل الحجاب الحاجز لدى التماسيح ما يخلق مكبساً حشوياً، غير أنّ الطريقة التي تتحقق بها هذه العملية مختلفة بين التماسيح والثدييات.

إلى وقت متأخر، كانت الرئات المقسّمة بحواجز للتماسيح والتماسيح الأمريكية Alligators تعتبر بدائية نسبياً ومن ثمّ قليلة الكفاءة. غير أنّ الاكتشاف الجذري الجديد لا يجعلنا نقوم بإعادة تقييم القابلية التنفسية للأشكال الموجودة فحسب، بل يعطينا أيضاً رؤية كاملة جديدة لنجاح الزواحف عبر الانقراض البرمي وفي أثناء الترياسي.

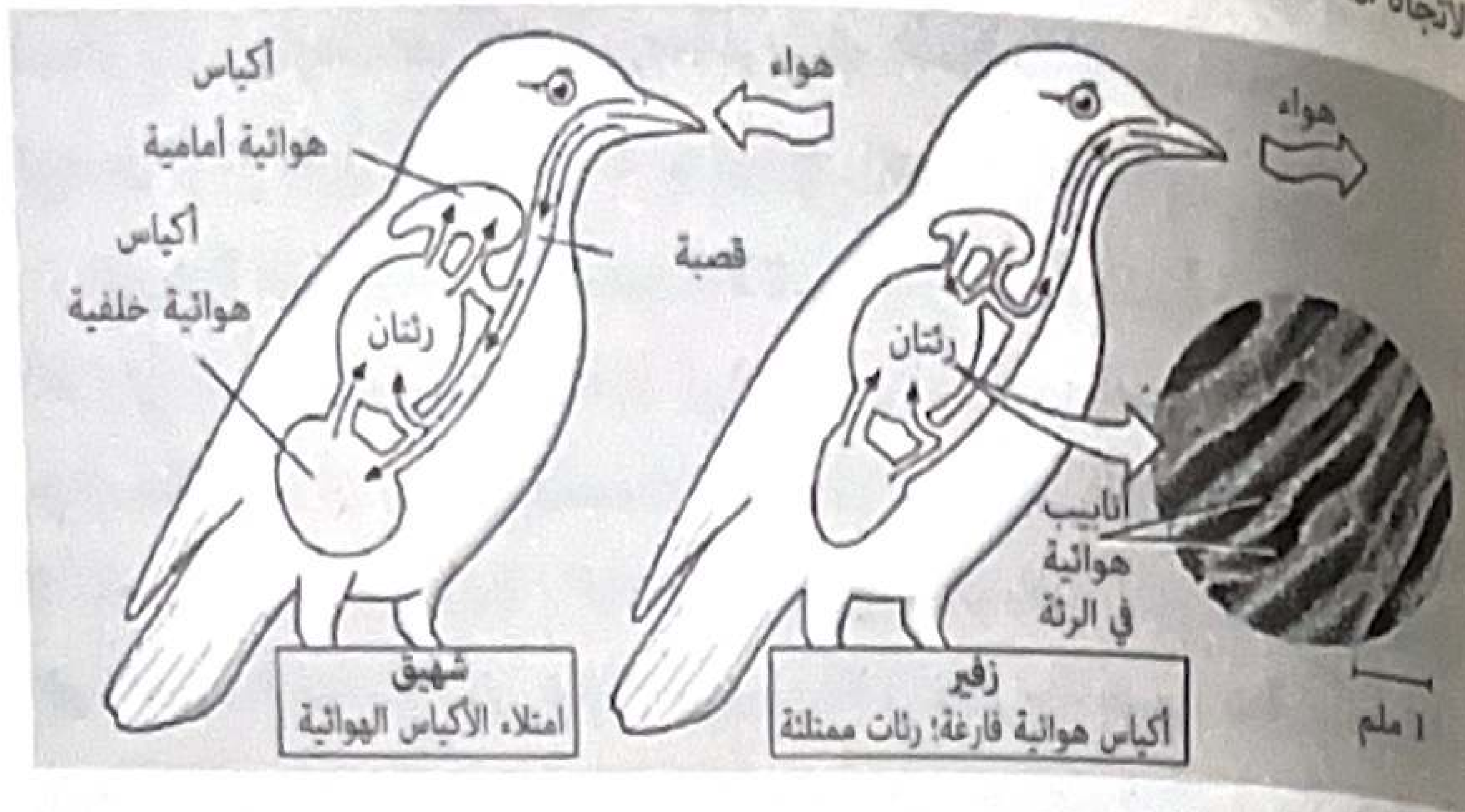
الطريقة الأقلّ كفاءةً في التنفس هي طريقة الثدييات: الشهيق والزفير عبر الأنبوب نفسه المؤدي إلى الرئتين. وتعود قلة الكفاءة تلك إلى اضطراب جزيئات الغاز مع انتهاء

الزفير وابتداء الشهيق الجديد. فمتى لزم التنفس السريع؛ يحدث تصادم فوضوي بين الهواء المزفور الذي يحاول الخروج قبل بدء الشهيق، وكثيراً ما تعود مع الشهيق جزيئات الغاز نفسها بما فيها أحجام من الهواء المحتوية على مزيد من ثاني أكسيد الكربون وقليل من الأكسجين. ولوقت طويل كان يعتقد أنّ التماسيح تعاني المشكلة نفسها أيضاً. غير أنّ دراسة في عام 2010 بيّنت أنّ التماسيح تستخدم مسارا منفصلاً وحيد الاتجاه مشابهاً لذلك الموجود لدى الطيور والديناصورات. والاكتشاف كان بأنّ زواحف الأصل Stem reptiles القديمة في الحقبتين البرمية والترياسية، وهي المجموعات التي نشأت منها التماسيح والطيور الحديثة والديناصورات المنقرضة كلها كانت أكثر فعاليةً في تنفسها مقارنة بالثيرابسيد Therapsid (طلائع الثدييات) المعاصرة لها، إذ إنها تجاوزت عملية التصفية المتمثلة بالانقراض البرمي بمنفعتين تنافسيتين عظيمتين، إنها كانت من ذوات الدم البارد وكان باستطاعتها أنْ تستخلص مزيداً من الأكسجين من الهواء مقارنة بالثدييات والزواحف الشبيهة بالثدييات. وكانت كل الظروف ضدنا نحن الثدييات. حقيقةً، لم تكن لدينا فرصةٌ في هذا التنافس الحاسم لمصيرنا المستقبلي وليس على النجاة فحسب بل لأجل السيطرة النهائية وسط أزمة وفوضى الانقراض الجماعي. وفي النهاية من النادر أنْ تكون ثدييات الحقبة الوسطى أكبر من الجرذان. ومن المحتمل أنها كانت جبانة مثل الجرذان أيضاً ومحاطة بالديناصورات.

جهاز أكياس الهواء في الطيور

إنّ آخر نوع عثر عليه من الرئات في الفقاريات البرية هو نوع من الرئات المقسّمة بحواجز. ويوجد أفضل مثال على هذا النوع من الرئات والجهاز التنفسي المرافق لها في جميع الطيور. فالرئات بحدّ ذاتها في هذا النظام صغيرة وقليلة المرونة نوعاً ما. لذلك لا تتمدد رئات الطيور وتتقلص بشكل كبير كما تفعل رئاتنا خلال كل نفَس. غير أنّ مشاركة القفص الصدري في التنفس كبيرة، وخاصةً الأضلاع الأقرب إلى الناحية الحوضية، إذ إنها كثيرة التحرك في ارتباطها بأسفل القص، وقابلية التحرك هذه مهمة جداً في السماح بحدوث التنفس، وليست هذه هي الاختلافات الأكبر. وبخلاف كبير عن الزواحف والثدييات الموجودة، تمتلك هذه الرئات لواحق مضافة لها تُدعى الأكياس الهوائية Air sacs، والجهاز التنفسي الناتج عالي الكفاءة، وذلك للسبب التالي: نحن الثدييات (وكذلك جميع اللاطيريات) ندخل الهواء إلى رئاتنا ذات النهاية المسدودة ثم نزفره. ولكن للطيور جهاز مختلف جداً.

وعندما يستنشق الطير الهواء بالشهيق، يدخل الهواء أولاً سلسلة من الأكياس الهوائية. وبعد ذلك يمرّ إلى داخل النسيج الرئوي المخصوص، لكنه لا يمرّ عبر الرئة إلا باتجاه واحد باعتبار أنه لا يمرّ نازلاً عبر القصبة الهوائية Trachea إنما من الأكياس الهوائية الموصولة بالرئة، ثم يخرج الهواء المزفور من الرئة. ويسمح تدفق الهواء وحيد الاتجاه عبر الأغشية الرئوية بخلق نظام تيار معاكس: يمرّ الهواء باتجاه واحد ويمرّ الدم الموجود ضمن الأوعية الدموية المتضمنة في الرئة في الاتجاه المعاكس. ويسمح التبادل ذو الاتجاه المعاكس باستخلاص أكثر فعاليةً للأكسجين وطرد أكثر فعاليةً لثاني أكسيد الكربون.



لقد قام المشرّحون بتشريح ووصف الطيور لقرون من الزمن. لذلك يبدو غريباً أنه لم نتوصل إلى فهم دقيق لتشريح الأكياس الهوائية في الطيور إلا في عام 2005. وقد حقن اثنان من علماء تشريح الطيور، باتريك أوكونر Patrick O'Connor وليون كلاسينس Leon Claessens، كمياتٍ كافية من البلاستيك سريع التصلب داخل الأجهزة التنفسية لأنواع مختلفة من الطيور، ثم شرّحا جثثها بعناية ووصفا تشريح الأجواف الممتلئة، الأكياس الهوائية المملوءة بالبلاستيك الآن.[4] وقد دُهشا عندما وجدا أنّ الأكياس الهوائية الطيرية أضخم وأعقد مما توقعه أي إنسان. وأمكن للمرة الأولى ملاحظة العلاقة الحقيقية بين الأكياس الهوائية والعظام الهوائية Pneumatized bones- العظام التي بداخلها تجاويف كبيرة. وفي المقال نفسه، قارن المؤلّفان تشريح العظام الهوائية في الطيور بالعظام الهوائية في الديناصورات. فقد كان التشابه مميزاً، إذ كانت هناك ثقوب ذات شكل مطابق في العظام المتطابقة (أو متماثلة المنشأ Homologous).

وهؤلاء الذين كانوا يعتقدون بغياب جهاز الأكياس الهوائية في الديناصورات لم ينفوا وجود الثقوب في عظام الديناصورات. فقد قالوا نعم إنّ الثقوب موجودة، غير

أنها ببساطة عبارة عن تكيفات لأجل تخفيف العظام. وعند نقطة محددة في سياق الجدل حول كون التشابه بالشكل مجرد مصادفة، تنهار هذه الحجة بعد أن أصبحت المصادفة أكبر من أن تكون مجرد مصادفة.

وفي مخطط الطيور الموجود صفحة 273، فإن الأكياس الهوائية المختلفة مرسومة لتظهر اتصالاتها بالرئتين. فمن الواضح أنّ حجم الأكياس الهوائية يتجاوز بشكل كبير حجم الرئتين بحدّ ذاتهما. فالأكياس الهوائية تشارك في تبادل الأكسجين، إنها تكيّف يسمح لجهاز التيار المعاكس بالعمل. ليس هناك أي شكّ في أن الفعالية الأكبر لهذا الجهاز مقارنة بالرئات لدى الفقاريات الأخرى جميعاً مرتبطة بجهاز التيار المعاكس ذي الدورتين الناتج بفعل تشريح الرئة ذات الأكياس الهوائية لدى الطيور.

وبحلول عام 2005، فقد كانت الدلائل ساحقة على أن كثيراً من الديناصورات كانت لها أكياس هوائية. وحتى ذلك الوقت، انخرطت إحدى مجموعات المشرحين في جدال حادّ حول أن رئات الديناصورات لم تكن تختلف عن رئات التماسيح المعاصرة إلا بالحجم، وأنّ الرئة الطيرية[5] ذات الأكياس الهوائية الإضافية الكثيرة إضافة إلى تدفق الهواء وحيد الاتجاه لم تظهر حتى الطباشيري، قبل نحو مئة مليون سنة - ولم تظهر إلا عند الطيور! لم تعد وجهة النظر هذه قابلة للتأييد. وفي عام 2005 لم يكن هناك أي تقدير لدرجة التغير الحاصل في مستويات أكسجين الغلاف الجوي في الحقبة الوسطى الباكرة، حتى وإنْ كان لهذه التغيرات أي أثر في تطور أجهزة التنفس المختلفة هذه.

إنّ جهاز الأكياس الهوائية أفضل من جهاز الثدييات. ويقدّر أنّ الطيور أكثر كفاءة من الثدييات في استخلاص الأكسجين من الهواء بنحو 33 في المئة عند مستوى سطح البحر. غير أنّ هذا الاختلاف يزداد في المرتفعات الأعلى: قد يكون الطير عند ارتفاع قدره 5000 قدم [نحو 1500متر] أكثر فعالية بنحو 200 في المئة في استخلاص الأكسجين مقارنة بالثدييات. وهذا يمنح الطيور تفوّقاً ضخماً على الثدييات والزواحف التي تعيش في المرتفعات. وإنْ كان جهاز كهذا موجوداً في غابر الزمن، عندما كان الأكسجين عند مستوى سطح البحر أخفض مما هو اليوم على ارتفاع 5000 قدم، فمن المؤكد أنّ تصميماً كهذا كان نافعاً لدرجة كبيرة، في المجموعة التي امتلكته لدى تنافسها وافتراسها للمجموعات التي لا تمتلكه.

نعلم أنّ الطيور تطورت من الديناصورات الصغيرة ذات القائمتين التي كانت من ذات سلالة الديناصورات الباكرة، مجموعة تُسمّى سحليات الورك. وتأتي هياكل الطيور الأولى من الجوراسي (على الرغم من أنه يوجد خلاف اليوم حول مدى كون الأنواع الباكرة

«شبيهة بالطيور»، مثل الأركيوبتيريكس *Archaeopteryx* المشهور، وسنعود إلى هذا لاحقاً). فالأكياس الهوائية المرتبطة برئات الطيور هي أنسجة رخوة، ولا تتأحفر إلا في شروط حفظ نادرة وغريبة جداً. ولذلك ليس لدينا دليل مباشر على وقت ظهور جهاز الأكياس الهوائية. ولكنّ لدينا دليلاً غير مباشر يكفي ليحمل مجموعة الباحثين الذين يعتقدون بوجود الأكياس الهوائية عند الديناصورات على طرح فكرة مفادها أنّ جميع الديناصورات سحليات الورك كان لديها جهاز الأكياس الهوائية مثل الموجود عند الطيور المعاصرة، وأنها كانت من ذوات الدم الحار كالطيور أيضاً. ويأتي الدليل من الثقوب الموجودة في العظام، قد تكون الأماكن التي توضّعت فيها الأكياس الهوائية.

ويعود الاعتراف بالأولوية على طرح الافتراض الجريء بأن الديناصورات كان لها جهاز رئوي طيري إلى روبرت باكر Robert Bakker. وكان معروفاً منذ أواخر القرن التاسع عشر بأنّ عظام بعض الديناصورات فيها تجاويف غريبة، تماماً كما في عظام الطيور. ولعقود من الزمن كان هذا الاكتشاف إما منسياً أو كان يُعزا إلى التكيف من أجل تخفيف العظام الضخمة، إذ إنّ كثيراً من هذه العظام ذات التجاويف، التي سُمّيت فيما بعد العظامُ الهوائية، شوهدت عند حيوانات اليابسة الأكثر ضخامة في تاريخ الحياة، الصوروبودات العملاقة في الجوراسي والطباشيري. وقد وجدت العظام الهوائية في الفقرات بشكل رئيس. وللطيور فقرات هوائية مشابهة، وبينما يمكن القول إن بعض عظام الطيور كانت خفيفة لتعزز الطيران، فإنه كان من الواضح أن بعضاً من الأكياس الهوائية المرافقة لرئات الطيور تموضعت في تجاويف العظام. وهكذا، فإنّ التجاويف الهوائية في عظام الطيور كانت تكيفاً لترتيب الأكياس الهوائية الشاغلة للحيز. إن أجسام الحيوانات مملوءة بالأعضاء الضرورية، ويبدو وضع الأكياس الهوائية في العظام المجوفة تطوراً منطقياً. غير أنّ باكر قطع شوطاً جريئاً في التفكير فاقترح أنّ العظام الهوائية الموجودة في الصوروبودات الأحفورية المحببة لديه قد تطورت لغاية مماثلة، وأنها كانت دليلاً مباشراً على أنّ الصوروبودات امتلكت واستعملت جهاز الأكياس الهوائية.

كانت غاية باكر الكبرى هي محاولة تقديم المزيد من الدلائل على أن الديناصورات من ذوات الدم الحار، ولم يكن يرمي إلى إثبات أن الأكياس مجرد تكيف مع انخفاض الأكسجين. وكان يعتقد أنّ الطيور، بسبب متطلباتها الضخمة من الطاقة والأكسجين المرتبطة بالطيران قد طوّرت جهاز الأكياس الهوائية لتلبية المتطلبات الأيضية (الاستقلابية) لثبات حرارة أجسامها.

وتابع باحثو الديناصورات الآخرون خُطا باكر، وقدم اختصاصي الأحافير واختصاصي الديناصورات مات ويديل Matt Wedel في عام 2003 دليلا لصالح وجود الأكياس الهوائية في الصوروبودات، في حين قدم اختصاصي الديناصورات غريغ بول Greg Paul أدلة مشابهة حول ذوات القائمتين في ذات الوقت تقريباً. وقد طرح في عام 2002 أنّ أول ما سُمّي الأركوصورات، وهي مجموعة الزواحف البدائية في أواخر البرمي عبر الترياسي الباكر (التي سمّيناها أركوصوريات الشكل)، والتي انبثقت منها في النهاية التماسيح والديناصورات والطيور، كانت لها أكياس الهوائية. ومن الأمثلة عن هذه المجموعة، والتي تضمّنت البروتيروزوخوس رباعي الحركة (الموصوف سابقا على أنه أحد أبكر الأركوصورات الترياسية)، لابدّ أنه كانت لديها رئات مقسّمة بحواجز كما في الزواحف. ومن الممكن أنْ يكون الشهيق قد دُعِم بواسطة جهاز الحجاب الحاجز البطني ذي المضخة (ربما أكثر بدائية من الجهاز الموجود اليوم في التماسيح المعاصرة). وما كان مجهولاً في ذلك الوقت هو أنّ التماسيح وصنفها لديها جهاز تنفُّس أفضل بكثير مما كان يُعتقَد حينئذ، بفضل ابتكارها طريقة جريان الهواء باتجاه واحد عبر الجهاز التنفسي.

لم يحدث هذا الاكتشاف إلا في عام 2010، وبكل تأكيد فإنه يؤثر في تصوراتنا حول اللياقة التطورية النسبية للتماسيح والديناصورات والثدييات. وفي الحقيقة، يبدو أنّ جميع زواحف الترياسي كانت «تتنفس» أفضل منا نحن الثدييات.

ويحتمل أن جهاز الأكياس الهوائية قد تطور بخطوات سريعة على الأقل في السلالة المؤدية إلى الديناصورات. أما التماسيح؛ فقد توقفت، لسوء حظها، عن الابتكارات الكبرى في جهازها التنفسي بوجود تشريح التدفق الخلالي المتطور حديثاً، فهي لم تجرب على الإطلاق العظام الهوائية والأكياس الهوائية.

وبحلول وقت أول ديناصور حقيقي في الترياسي الأوسط، ربما كان جزء من جهاز الأكياس الهوائية موجوداً بالفعل. فلا يوجد عند الثيروبودات *Theropoda* الأكثر بدائية (الديناصورات الأولى) في هذا الزمن عظام هوائية، قد تكون الرئة بحد ذاتها صارت غير مرنة وأصغر نوعاً ما، وهما من مميزات رئات الطيور الموجودة. وفي الأشكال الجوراسية مثل الألوصور *Allosaurus*، يحتمل أنّ جهاز الأكياس الهوائية كان مكتملاً بشكل أساسي لكنه ما زال مختلفاً كثيراً عن جهاز الطيورالمعدَّل من

أجل الطيران (إذ إنّ الطيور المعاصرة غير القادرة على الطيران أصلها طيور طائرة في الزمن الغابر) ذي أكياس هوائية بطنية وصدرية ضخمة.

وبحلول زمن تطور الأركيوبتيريكس في الجزء المتوسط من الجوراسي، يحتمل أنه كان هناك تنوع كبير في الأنماط التنفسية بين الديناصورات، بعضها لديه عظام هوائية والآخر لا يمتلك ذلك. وربما جرى قدر عظيم من التطور المتقارب. فعلى سبيل المثال، قد تكون التهوية الواسعة في عظام الصوروبودات الكبيرة التي درسها ويديل Wedel بعناية قد انبثقت بشكل مستقل نوعاً ما عن الجهاز الموجود لدى سحليات الورك ذات القائمتين.

ملاحظة أخيرة حول الأكياس الهوائية: بينما هي عامة، أي موجودة عند جميع الديناصورات سحليات الورك، فلا يوجد حتى الآن دليل على الأكياس الهوائية في مجموعة الديناصورات الضخمة الأخرى وهي طيريات الورك، بما في ذلك ديناصورات منقار البط Duck-bills والإغوانودونات Iguanodons والسيراتوبسيات ذات القرون - وليس من المصادفة (لهذه المجموعات الثلاث) أن جميعها من الطباشيري وليس الجوراسي. وغياب جهاز الأكياس الهوائية في هذه المجموعة ينسجم جيداً مع توزُّعها عبر الزمن. ففي أوقات الجوراسي ذات الأكسجين المنخفض كانت عناصر صغرى من الحيوانات. ولم تكن هذه المجموعة الثانية العظيمة من الديناصورات شائعة إلى أنّ حدث الارتفاع العظيم في الأكسجين في الجوراسي المتأخر وعبر الطباشيري.

ربما كانت الديناصورات الباكرة شبيهة نوعاً ما بالأسود: تنام عشرين ساعة في اليوم لتصون الطاقة بسبب ما يفرضها عليها انخفاض الأكسجين، ولكن عندما تصيد تكون في غاية النشاط، وأكثر نشاطاً مقارنة بأي من منافسيها والتي تضمّنت على الأغلب الأركوصورات اللاديناصورية (مثل التماسيح الباكرة) والسينودونت والثدييات الحقيقية الأولى. وكل ما كانت تحتاج إليه هو أنْ تكون أفضل من الآخرين. وتقترح جميع الدلائل بأنها كانت الأفضل حقاً.

ربما كانت المركبات الأيضية أكثر تنوّعاً بكثير مقارنة بتقسيمنا الفرعي البسيط إلى ذوات الدم الحارة وذوات الدم البارد. وبينما يمكن أن توضع الطيور والزواحف والثدييات المعاصرة في إحدى هاتين الفئتين، فإنه في الحقيقة توجد أنواع كثيرة من الكائنات الحية التي تستطيع توليد الحرارة في أجسامها من دون موارد حرارة

خارجيـة، ومنهـا الحـشرات الطائرة الكبيرة وبعض الأسـماك والأفاعي الكبيرة والسحالي الكبـيرة. وحيوانـات كهذه داخلية الحرارة Endotherms، لكـن ليس بمفهوم الثدييات والطيـور. ربمـا كانت هناك أنواع كثيرة من الاستقلاب في التنـوع الضخم للديناصورات الموجـودة حينذاك.

لم تكـن الديناصـورات وحيـدة على المسرح الجوراسي، إذ كان أسلافنا موجودين بأحجام صغـيرة جداً كما كانت حيوانات اليابسـة وحيوانـات البحـر الأخرى بها، فيـه السـلاحف عـلى اليابسـة وفي البحر إضافـة أيضاً إلى البليسـيوصور طويـل الرقبة والتماسيح. ولكـن مـن المؤكـد أنّ الديناصـورات كانت هي المسيطرة على اليابسة. وبينـما يبـدو لأول نظرة أنـه كان هناك كثير من أنواع أشكال أجسام الديناصورات، فلـم تكـن هناك في الحقيقة سـوى ثلاثة. وتشـترك الثلاثة بخاصية واحـدة مع الطيور والثدييـات: وضعيـة منتصبـة كاملـة. وقـد كانـت أنـواع الديناصـورات الثلاثـة هي ثنائيـات الحركـة ورباعيـات الحركـة قصيرة الرقبـة ورباعيـات الحركة طويلـة الرقبة. وكان لـكل منها زمـن منشـأ مختلف وزمـن مختلف لذروة الانتشـار. ويبـدو واضحاً لنا خمسـة تجمعات متميزة ومتعاقبة من «أنماط الأشـكال» (المخططات الجسمية) الديناصورية وهـي كالتالي:

1. الترياسي المتأخر: ظهرت الديناصورات الأبكر في الثلث الأخير من الترياسي لكنها بقيت في الخمسة عشر مليون سنة الأولى من وجودها قليلة التنوع. وكانت معظم أشكالها من سحليات الورك اللاحمة ذات القائمتين. وتطورت سحليات الورك رباعية الحركة (الصوروبودات) بحلول نهاية الحقبة. وتشعّبت طيريات الورك عن سحليات الورك قبل نهاية الترياسي، لكنها شكلت نسبة صغيرة من أنواع الديناصورات وأفرادها. وفي معظم الترياسي كان حجم الديناصور صغيراً، من متر واحد إلى ثلاثة أمتار، وكانت أبكر طيريات الورك (مثل البيسانوصور *Pisanosaurus*) ذات القائمتين بطول متر واحد وكان لها جهاز فكّي جديد متخصص بتقطيع النباتات. وفي أواخر الترياسي يظهر التشعب الملموس الأول للديناصورات، ويحدث بين سحليات الورك مع تطور اللواحم ذات القائمتين حجماً وعدداً والعملقة الأولى بين الصوروبودات الباكرة (مثل بلاتيوصور *Plateosaurus* في الترياسي المتأخر).

2. الجوراسي الباكر إلى المتوسط: سحليات الورك ذات القائمتين ورباعيات الحركة طويلة الرقبة تسود الحيوانات. وفي أثناء هـذا الوقت، مع أنّ طيريات الورك بقيت صغيرة الحجم وقليلة العدد، إلاّ أنها تنوّعت إلى سلالات رئيسة والتي في النهاية ستسيطر على تنوع الديناصورات في الطباشيري. وتتضمن هذه السلالات ظهور أشكال ذات دروع ثقيلة (مثل ذوات التروس، أو الثيريوفورات *Thyreophorans*). وهذه رباعيات الحركة وتتضمن الستيغوصور الأول من الجزء المتوسط من الجوراسي. ومجموعة ثانية هي طيريات الورك الجديدة، أو النيورنيسكيات *Neornischia*، غير المدرعة (وتشمل طيريات الأقدام، أو الأورنيثوبودات *Ornithopoda*، مثل الهيبسيلوفودونتيات *Hypsilophodontia* والإغوانودونات *Iguanodontia* وديناصورات منقار البط - وهامشيات الرأس، أو المارغينوسيفاليات *Marginocephalia*، ومنها قرنيات الوجه (الكيراتوبسيات *Ceratopsia*)، التي لا تظهر حتى الطباشيري - والباكيسيفالات Pachycephalosauria ذات الرأس العظمي). ولكن الصوروبودات هي الأبرز عددياً، وقد انقسمت إلى مجموعتين في الترياسي المتأخر: طلائع الصوروبودات، والصوروبودات الحقيقية؛ وفي الجوراسي الباكر والمتوسط كانت طلائع الصوروبودات أكثر تنوّعاً بكثير من الصوروبودات، لكنها انقرضت في وقت الجوراسي المتوسط مؤدية إلى تشعب ضخم للصوروبودات في الجوراسي المتأخر.

كما أبدت سحليات الورك ذات القائمتين تنوّعاً ونجاحاً في الجوراسي الباكر والمتوسط. وفي زمن الترياسي المتأخر انقسمت إلى مجموعتين: (السيراتوصورات *Ceratosaurs* والتيتانورات *Tetanurans*). وسيطرت السيراتوصورات في الجوراسي الباكر، لكن بحلول الجوراسي المتوسط ازدادت أعداد التيتانورات على حساب السيراتوصورات. وهذه أيضاً انقسمت إلى مجموعتين: إحداهما نظائر السيراتوصورات *Ceratosauroids*، والأخرى السيلوفيزيدات *Coelophysids*. وفي النهاية أنتجت المجموعة الأخيرة الديناصور الأكثر شهرة على الإطلاق: تيرانوصور ريكس *Tyrnnosaurus rex* من الطباشيري المتأخر، مع أنّ أعضاءها في الجوراسي المتوسط

كانوا أصغر بشكل ملموس. وكان تطورها الأكثر أهمية في الجوراسي هو تطور السلالات التي نشأت عنها الطيور.

3. **الجوراسي المتأخر:** كان هذا زمن العمالقة. وتأتي الصوروبودات الأضخم من صخور الجوراسي المتأخر، وتستمرّ سيطرتها إلى الجزء الباكر من الطباشيري. وحافظت سحليات الورك اللاحمة على هذا الحجم الضخم بوجود عمالقة نموذجية مثل الألوصور *Allosaurus*. لذلك كان الجانب الأكثر جدارة بالذكر لهذه الفترة الزمنية هو ظهور أحجام أضخم بكثير منها في الجوراسي الباكر والمتوسط، ولم يكن هذا فقط لدى سحليات الورك. أيضاً ازدادت أحجام طيريات الورك المدرعة في أثناء الجوراسي المتأخر، وبالدرجة الأولى عند الستيغوصورات ذات الدروع الثقيلة. إنّ تنوع طيريات الورك في هذا الوقت مع ظهور الستيغوصور والأنكيلوصور *Ankylosaurus* والنودوصور *Nodosaurus* والكامبتوصور *Camptosaurus* والهيبسيلوفونتيدات *Hypsilophontida* يغيّر جذرياً مظهر تجمعات الديناصورات.

4. **الطباشيري الباكر إلى المتوسط:** بينما بقيت العناصر المسيطرة في الجزء الباكر من هذه الفترة الزمنية هي الصوروبودات الضخمة، ظهر تحول كبير مع تقدم الطباشيري: ازداد كلٌّ من تنوّع ووفرة طيريات الورك إلى أن فاقت بأعدادها سحليات الورك. وتكون الصوروبودات نادرة بشكل متزايد، إذ تعرّض كثير من أجناس الصوروبودات للانقراض في نهاية الجوراسي.

5. **زمن الطباشيري المتأخر:** ارتفع تنوّع الديناصورات بسرعة. أتى معظم هذا التنوع من خلال أعداد هائلة من طيريات الورك الجديدة: السيراتوبسيات والهادروصور *Hadrosaurs* والأنكيلوصور من بين الآخرين. ولم يكن هناك سوى عدد صغير من الصوروبودات.

لا يمكن عزو أي تطور تاريخي إلى عامل وحيد. فقد تغير شكل الديناصورات من تفاعلات «المفترس - الفريسة» والتنافس فيما بينها ومع الآخرين في عالمها وربما حتى تغير المناخ الناجم بجزء كبير منه عن الارتفاعات والانخفاضات المذهلة في

مستوى سطح البحر خلال الجوراسي والطباشيري - ففي نقطة معينة ارتفع مستوى سطح البحر إلى درجة جعلت من أمريكا الشمالية قارتين صغيرتين منفصلتين، يفصل إحداهما عن الأخرى بحر كبير، حتى وإن لم يكن عميقاً، اتجاهه من الشمال إلى الجنوب. ومع ذلك لابدّ أنّ تكون مستويات الأكسجين قد أدت دورها أيضاً.

كان زمن تجمع الديناصورات الأول، تجمع الترياسي المتأخر، زمن مستويات منخفضة من الأكسجين، مقترنا بمستويات مرتفعة جداً من ثاني أكسيد الكربون فكان هو السبب الرئيس للانقراض الجماعي الترياسي-الجوراسي، وليس الاصطدام بكويكب. وكانت آلية الإبادة هي تضافر انخفاض الأكسجين مع ارتفاع درجات الحرارة عالمياً. ومع ذلك تُبيِّن الأبحاث التي درست عدد أصناف فقاريات اليابسة قبل وبعد الانقراض الجماعي الترياسي الجوراسي بوضوح أنّ الديناصورات سحليات الورك نجت من حدث الانقراض الجماعي هذا أفضل من أي مجموعة أخرى من الفقاريات، وقد يكون أحد الأسباب المهمة لذلك جهازها التنفسي المتفوق، بسبب رئاتها ذات الأكياس الهوائية، والتي منحتها تفوقاً تنافسياً على الحيوانات البرية ذات الرئات المختلفة.

ومن جهة أخرى لم يكن عند الديناصورات طيريات الورك جهاز تنفسي بكفاءة الجهاز التنفسي عند سحليات الورك. إلا أنها كانت متفوقة تنافسياً على سحليات الورك العاشبة من حيث الحصول الطعام ورؤوسٌ أضخم وفكّان أقوى وأسنان أفضل. ومع ارتفاع تركيز الأكسجين إلى مستويات قريبة من أيامنا الحالية في الطباشيري، صارت طيريات الورك العواشب الرئيسة بفضل هذا التفوق؛ ما أدى إلى انقراض كثير من سحليات الورك العاشبة من خلال الإقصاء التنافسي.

وبينما اتّسم الانتقال من الجوراسي إلى الطباشيري بارتفاع مهم سريع نسبياً في أكسجين الغلاف الجوي، فقد جرت في الوقت نفسه أحداث أخرى، وأحد هذه الأحداث هو تحطم قارة البانغيا Pangaea، التي كانت يوماً ما تشمل جميع القارات، إلى قارات أصغر. وحدث آخر، ربما أكثر أهمية فيما يتعلق بكل من التنوّع والبنية التصنيفية لحيوانات ديناصورات الحقبة الوسطى المتأخرة، هو التغيّر الجذري في النباتات. فقد تطورت الديناصورات في عالم تسوده عاريات البذور - من الصنوبريات، وكذلك السراخس والنخيليات والجنكة الصينية. ولكن في الجزء الباكر من الطباشيري ظهر نمط جديد من النباتات، هو النباتات الزهرية.

وبفضل هذه الطريقة الجديدة للتكاثر وتكيفات أخرى، مرّت هذه النباتات مغطاة البذور، بتشعّب تكيفي سريع. إنها تغلبت تنافسياً على النبات المبكر في كل مكان على كوكب الأرض تقريباً، إلى درجة أنه مع نهاية الطباشيري، قبل نحو 65 مليون سنة، شكلّت مغطاة البذور نحو تسعين في المئة من الغطاء النباتي. لابدّ أنّ هذا التحول في أنماط الطعام قد أثر في العواشب، وأشكال العواشب المتوفرة للافتراس لابدّ أنه أثر مباشرة في مخططات جسم اللواحم. فلابدّ أنّ اصطياد صوروبود من الجوراسي المتأخر يختلف كثيراً عن اصطياد هادروصور (أي ديناصور منقار البط) من الطباشيري المتأخر.

ويعتمد أكل الأعشاب على ملاءمة الأسنان للنباتات المتوافرة. ربما عاشت الصوروبودات على إبر الصنوبريات، فأجسادها البرميلية الضخمة جداً تعمل كصهاريج اختمار عملاقة لأجل هضم مورد غذائي عسير الهضم نسبياً. ولابدّ أنّ ظهور النباتات عريضة الأوراق، أي مغطاة البذور، قد تطلب أسناناً وسطوح عض مختلفة عن تلك الملائمة لتقطيع إبر الصنوبر عن الأشجار. لذلك، فإنّ التحول من الحيوانات التي تسودها الصوروبودات في الجوراسي إلى الحيوانات التي تسودها طيريات الورك في الطباشيري كان مرتبطاً بالتأكيد، حتى ولو جزئياً، بالتغيّر في الحياة النباتية. لكن ربما أدى التنفس دوراً أيضاً، وربما لو لم يرتفع الأكسجين فوق 15 في المئة لما سادت طيريات الورك.

رئات ديناصورات الجوراسي-الترياسي وتطور الطيور

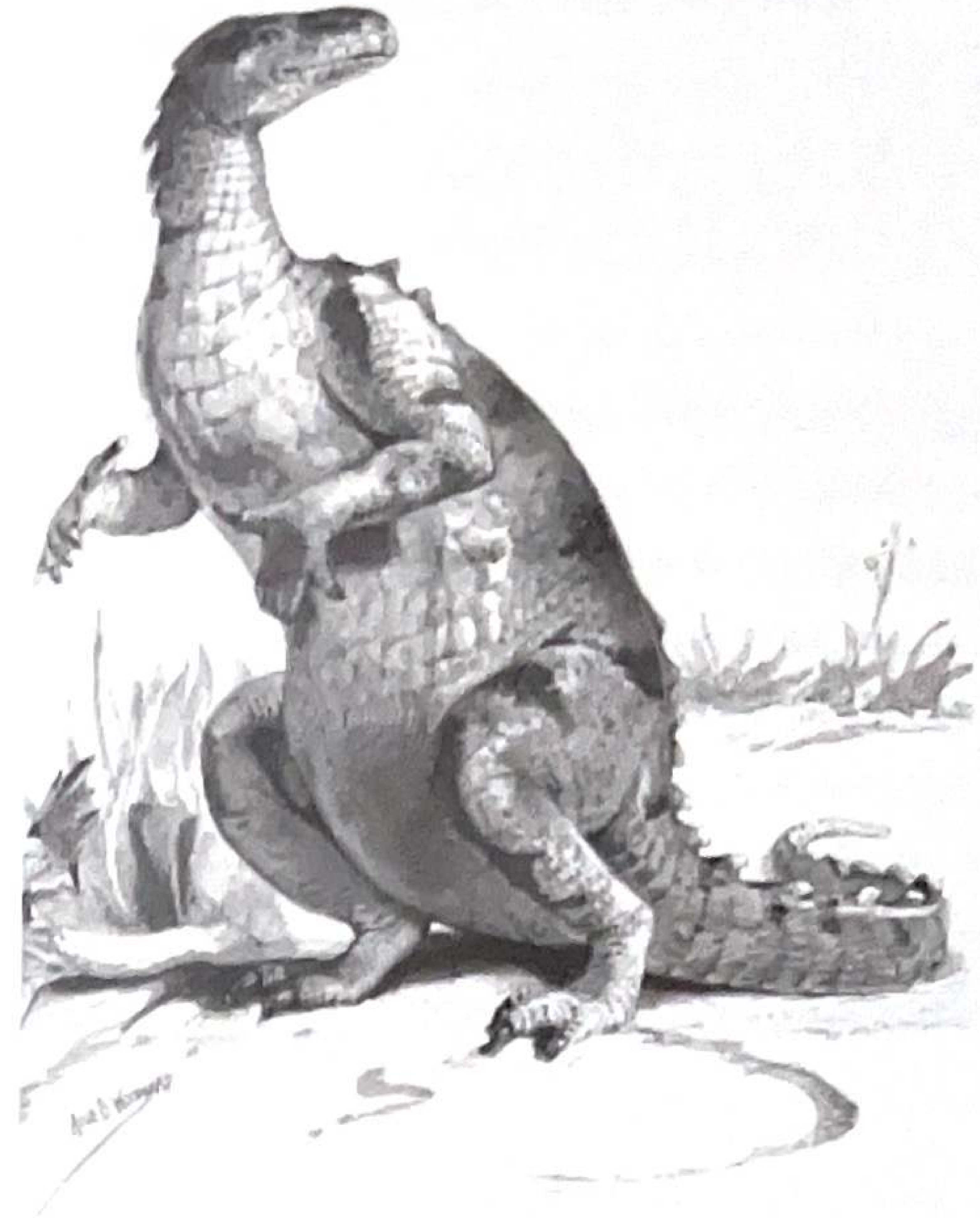
نطرح هنا أنّ الديناصورات الأولى كانت شكلاً من الحيوانات التي لم يكن لها نظير من قبل قطّ ولم تعدْ على قيد الحياة الآن: من خلال الوضعية المنتصبة وجهاز الأكياس الهوائية تطورت لديها كفاءة تنفسّية (أي كمية الأكسجين المستخلَصة من الهواء لكل وحدة زمن، أو لكل وحدة طاقة مبذولة في التنفس) تتفوق على أي حيوان كان موجوداً آنذاك. غير أن هذه الأشكال الباكرة يحتمل أنها فقدت حرارة الجسم الثابتة؛ فتحوّلت إلى كائنات ذات حرارة متبدلة، وكان اللجوء إلى حرارة الجسم المتبدلة حيلةً لخفض استهلاك الأكسجين في أثناء الراحة، إضافة إلى جهاز رئوي عالي الكفاءة يسمح بتحرك مديد من دون الدخول في حالات لا هوائية السريعة (ومن ثمّ السمية) في أثناء النشاط. ونعلم أنّ الطيور، وهي مجموعة من ديناصورات أول ما ظهرت في الجوراسي، صارت تتصف في النهاية بثبات الحرارة الداخلية ونوع مختلف جداً من الرئات عن أيٍّ من الزواحف الموجودة.

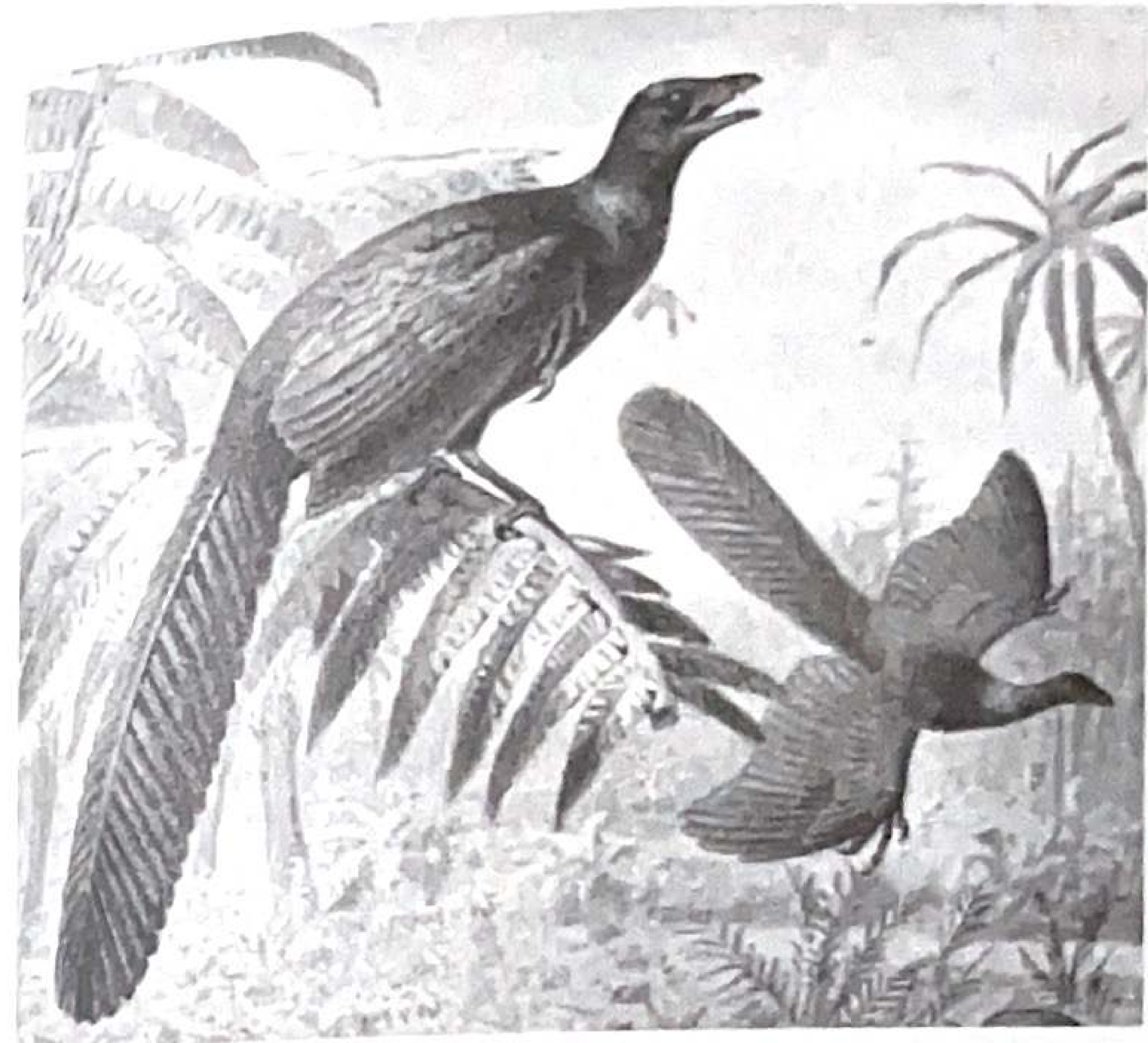
الديناصورات الطيرية والطيور الديناصورية

ربما مع استثناء التيرانوصوريات الجذابة على الدوام، لم تحظَ أي مجموعة من الديناصورات في أيامنا بالاهتمام أكثر من الطيور الأساسية. وتركز النقاشات النشيطة على ما كان يغطي أجسامها، لكن الأهم من ذلك وقت تطوّر الطيران لديها لأول مرة وأسباب تطوّره.

ظهرت الطيور الأولى قبل نحو 150 مليون سنة، ويبقى الطائر الأول المشهور هو الأركيوبتيريكس. وكان ذلك مباشرة قبل بدء الجوراسي. وكان الأكسجين يرتفع لمدة خمسين مليون سنة في ذلك الوقت. وكانت العملقة لدى الديناصورات شائعة. وكانت الأسلاف المباشرة للطيور ديناصورات سريعة الجري على الأرض، وربما استخدمت أطرافها الأمامية لأجل نوع من الافتراس، وهي حركة تكيُّفية سابقة على رفرفة الجناح في طائر، ذلك وفقا لاختصاصيّ الأحافير كيفين باديان Kevin Padian، من بيركلي Berkeley. ويشير السجلّ الأحفوري إلى أنّ أسلاف الطائر الأول كانت من سحليات الورك اللاحمة ذات القائمتين مثل الترودونتيدات *Troodontids* أو ربما الدروميوصوريدات *Dromaeosaurids*، وهي أشكال يبدو أنها كانت بالأصل مكسيّة بالريش.

هل كان الأركيوبتيريكس يستطيع الطيران؟ يعتقد معظم الاختصاصيين الآن أنه كان يطير. ولكن هناك جدالاً حول زمن ظهور الطيران الحقيقي. هل كانت «طيور» الجوراسي المتأخر تستطيع الطيران فعلاً، في وقت كان عليها أن تتنافس على المجال الجوي مع البتيروداكتيلات *Pterodactyls* المتنوعة والناجحة؟ ويشير السجلّ الأحفوري إلى أنه في الطباشيري الأدنى توجد أُحفورة طائر (أيوآلولافيس *Eoalulavis*) والذي طوّر «جناحاً إبهامياً» Thumb wing، وهو تكيُّف يسمح بالطيران بسرعات أقلّ مع مناورة أكبر. وهكذا، خلال بضعة ملايين سنة بعد الأركيوبتيريكس، كان الطيران المتقدم موجوداً. والاكتشافات الجديدة من الصين أسفرت عن تنوّع كبير غير متوقع في الطيور التي كانت موجودة أصلاً في الجزء الباكر من الطباشيري. وكان الطيران تكيّفاً حفّز تطوّراً سريعاً لأشكال جديدة. وسنعود إلى تاريخ تطوّر الطيور في فصل تالٍ، إذ إنّ معظم قصتها قد حدثت ما بعد الجوراسي.





إن الطيران في الطيور مستهلِك للطاقة، فهي تستخدم قدراً عظيماً من الطاقة كي تطير، وهذا مضاف إليه أحجامها الصغيرة نسبياً، وكونها من ذوات الدم الحار يجعلها من تستخدم أكسجيناً كثيراً. إذن، جهاز أكياسها الهوائية يخدمها جيداً.

تكاثر الديناصور ومستويات الأكسجين

واحد أعظم اكتشافات علم الأحافير في القرن العشرين هو العثور على بيوض الديناصور.[6] وفي النصف الأخير من ذلك القرن، أشارت الأنماط المعقدة في البيوض الأحفورية المرافقة إلى التعقيد السلوكي في تكاثر الديناصورات، أو على الأقل في أجزائه المتعلقة بوضع البيض. وفي هذا القرن أدى التوفر الواسع للآلات الحديثة - جهاز الأشعة المقطعية المحوسب الصغير - إلى ثورة ثالثة في فهم تكاثر الديناصورات. ويمكن الآن فحص البيوض دون إحداث أضرار فيها لإظهار الأجنة الدقيقة في داخلها، وهناك فهم متزايد ليس حول نمو هذه الأجنة فحسب، بل كذلك حول بنية البيوض ذاتها - أي تفاصيل تصميمها ووظيفة كل من هذه التفاصيل.

وتبدي الطيور اختلافاً صغيراً في جانب واحد على الأقل من جوانب تكاثرها، الطيور الموجودة التي هي أفضل نافذة لنا على الديناصورات، تضع جميعها البيض ذي القشرة الكلسية المسامّية. ولا توجد ولادة حية في الطيور، على النقيض من الزواحف الموجودة إذ بينها سلالات كثيرة تلجأ إلى الولادة الحية. كما يوجد اختلاف كبير في مورفولوجيا البيض بين الطيور وبعض الزواحف. ففي حين تتألف قشرة البيضة في الطيور والزواحف من طبقتين، غشاء داخلي عضوي تعلوه طبقة خارجية بلورية، فإن كمية تلك المادة البلورية تختلف اختلافاً كبيراً: من طبقة سميكة من كربونات الكالسيوم كتلك التي في الطيور إلى غياب كامل تقريباً للمادة البلورية؛ ما يجعل الطبقة الخارجية غشاء جلدياً ومرناً، حتى إنّ الطبيعة المعدنية للطبقة البلورية تختلف من الكالسيت Calcite عند الطيور والتماسيح والسحالي إلى الأراغونيت Aragonite (شكل مختلف من بلورة كربونات الكالسيوم) عند السلاحف. لذلك تقسم البيوض إلى نوعين رئيسين: بيوض قاسية، أو بلورية؛ وبيوض طرية، أو رقّية Parchment. ويقسِّم بعض الباحثين البيوضَ الرقية أيضاً إلى: مرنة (كما في بعض السلاحف والسحالي)، وطرية (كما في معظم الأفاعي والسحالي). ولا عجب في أن إمكانية التأحفر لفئات القساوة المختلفة من البيوض تختلف اختلافاً عظيماً. فهناك

العديد من الأحافير المعروفة للبيوض القاسية (كثير منها من الديناصورات) وقليل من البيوض المرنة ولم تكتشف أحافير مؤكدة لا جدال فيها لبيوض طرية.

ونظراً للاهتمام الكبير بالديناصورات، فهناك تخمينات كثيرة حول عاداتها التكاثرية (إن فكرة تزاوج سيزموصورين عملاقين تفوق الخيال)، ومازال هناك كثير من الألغاز. كان أحد الاكتشافات الثورية حول الديناصورات هو أنّ الديناصورات كانت تضع بيوضاً كلسية ضخمة تؤلّف بلورات الكالسيت فيها الطبقة المعدنية، وهو اكتشاف من البعثة الاستكشافية الأولى إلى صحراء غوبي من قبل المتحف الأمريكي للتاريخ الطبيعي في عشرينات القرن العشرين. ومنذ ذلك الحين عُثر على آلاف من بيوض ديناصورات العصر الطباشيري، وقد فتحت أنماط التعشيش المكتشفة والمنشورة من قبل جاك هورنر Jack Horner في مونتانا نافذة على تكاثر الديناصورات. فهل هذه الاكتشافات الطباشيرية مميزة للديناصورات ككل؟ ولا تزال هذه المسألة غير محلولة ومثيرة للجدل. بينما يعتقد معظم العلماء أنّ الديناصورات كانت تضع بيوضاً ذات قشرة قاسية، غير أنّ هذا بعيد كلّ البعد عن الإثبات القطعي، وكما سنرى لاحقا، توجد دلائل غير مباشرة على أن بعضاً من الديناصورات الباكرة ربما استخدمت البيوض الرقّية أو حتى الولادة الحية.

إن مصدر جميع بيوض الديناصورات تقريباً من الطباشيري. فهناك اختلاف كبير في طبيعة شكلها البلوري وحجمها وعددها وطرُز رسوم المسام فيها. غير أنّ الاختلاف ليس هو المسألة العلمية الأكثر أهمية. فبيوض الديناصورات من الجوراسي أقلّ بكثير، ولا يكاد هناك أي بيوض ديناصورات من الترياسي. تُرى ما السبب؟ هل له علاقة بالأنواع المختلفة لخصائص الحفظ في عالم الطباشيري وكيفية تحوّل أو عدم تحوّل الأغراض على اليابسة إلى أحافير؟ أو أنها كانت بسبب مستويات أقلّ بكثير من الأكسجين في الترياسي والجوراسي مقارنة بالطباشيري (وخاصة الطباشيري المتأخر، الذي اكتشفت فيه الأغلبية الساحقة من بيوض الديناصورات)؟

هناك عدة احتمالات: ربما يوجد فعلاً شيء من تحيُّز الحفظ، أي إن بيوض ما قبل الطباشيري شائعة بقدر شيوع بيوض الطباشيري، ويعود الاختلاف إلى الامتداد الأصغر لشرائح الصخور الحاوية للديناصورات في الترياسي والجوراسي مقارنة بالمدى الواسع لشرائح العصر الطباشيري، وفي هذه الحالة يعود الاختلاف ببساطة إلى حجم العينة. والاحتمال الآخر (وهو مختلف) هو أنّ بيوض ما قبل الطباشيري كان يتحجر منها نسبةٌ أقلّ من بيوض الطباشيري. فمن المؤكد أنّ هذا هو الحال إنْ كانت بيوض ما قبل

الطباشيري جلدية مثل بيوض الزواحف المعاصرة، لا متكلسة كما في الطيور. وإذا كان الأمر أن بعض الديناصورات لا تضع البيوض بل تلجأ إلى الولادة الحية مثل الإكتيوصور البحري، فمن المؤكد أن البيوض التي يمكن العثور عليها ستكون أقلّ. وكما هي الحال في كثير جداً من جوانب تاريخ الحياة، ربما أدى مستوى أكسجين الغلاف الجوي دوراً رئيساً في فرض طريقة التكاثر.

للبيوض الأحفورية من رواسب الطباشيري والمعزوة إلى الديناصورات غلاف من كربونات الكالسيوم مثل بيضة الدجاج (لكنه أسمك)، لكن بخلاف بيوض الدجاج الملساء عادة لم تكن بيوض الديناصورات مزخرفة إما بحواف طولية أو زخرفات عُقديّة. ومن المحتمل أنّ الزخرفات سمحت بدفن البيوض بعد خروجها من الأنثى، فكانت الزخرفات تسمح بتدفق الهواء بين البيوض والمادة التي دفنت فيها. ربما ساعدت القدرة على دفن البيوض على إمكانية حفظها في السجل الأحفوري، وربما تساعد على شرح سبب وجود كثير جداً من بيوض الطباشيري وقليل جداً من الأنواع الأخرى. كما أن التكلس الشديد للبيوض ساعدها على مقاومة الضغط الزائد للدفن في التربة أو الرمل.

ومن المعروف الآن أيضاً السلوك المعقد في بناء العش وترتيب البيوض في أكوام الدفن في الطباشيري المتأخر، لكنه ليس قبل ذلك. وقد قام الترووودون *Troödon* الديناصور ثنائي القوائم من الطباشيري المتأخر بترتيب بيوضه في أزواج متراصة أو عمودية، في حين بيّن جاك هورنر طُرز دفن معقدة عند هادروصور الطباشيري المتأخر في مونتانا.

إنّ فوائد البيوض الكلسية هو أنها متينة وأصعب كسراً بالنسبة إلى الكائنات المفترسة، كما أنها تساهم في النمو، إذ ينحلّ جزء من كربونات الكالسيوم الموجود في قشرة البيضة خلال نمو الجنين داخل البيضة ويستخدم في نمو العظام. كما أن القشرة قد تقي البيوض من العدوى الجرثومية. ولكن لهذا ثمنه. ولن تسمح كربونات الكالسيوم حتى ولو كانت بسماكة قشرة البَيضة بمرور الهواء أو الماء إلى داخل القشرة أو إلى خارجها. ولكن الأجنة النامية بحاجة إلى كل من الماء والأكسجين. لذلك توجد في جميع البيوض الكلسية مسامات؛ مما يسمح بدخول الهواء المحمل بالأكسجين، لكن ليس كثيراً جداً من المسامات كي لا تسمح للماء للخروج ومن ثم الجفاف. ولضمان الماء الكافي، يحتوي الجزء الداخلي من البيضة كمية كبيرة من مركب يعرف بالألبومين (الذي نعرفه على شكل «بياض» بيضة الدجاج)، والذي يزوّد الجنين بالماء، ويوجد هذا النوع من البيوض عند جميع الطيور والتماسيح.

أمّا النوع الثاني من بيوض الزواحف، البيضة الرقّية؛ فموجود عند السلاحف ومعظم السحالي. ويمكن لهذا النوع من البيض أخذ الماء والتمدد فعلياً في الحجم مع امتصاص الماء. غير أنّ نفوذية الماء ذات اتجاهين، إذ إن البيوض الرقّية تفقد الماء بسهولة أيضاً. ودفن هذه الأنواع من البيوض في أعشاش، وهي عادة كثير من السلاحف والتماسيح الأمريكية)، يخفض فقد الماء كما أنه إضافة إلى ذلك يعمل على إخفائها عن المفترسين.

ويحمل دفن البيوض بعض المخاطر: تحتاج جميع الأجنة النامية إلى الأكسجين، لذا يتطلّب الجنين بيضة تسمح بمرور الأكسجين من الغلاف الجوي إلى داخل البيضة. فإذا كانت البيضة مدفونة عميقاً جداً أو في مادة كاتمة، سيختنق الجنين. وإذا وضع البيوض على ارتفاع عالٍ، فإنها تتعرض للخطر نفسه، حتى لو كانت محاطة برعاية الأبوين. فقد ركّز علماء البيولوجيا حتى الآن على دور الحرارة كمتغير رئيس يؤثر في سرعة النمو عند الزواحف والطيور. غير أنّ الدلائل من مراقبة سحالي المرتفعات العالية تشير إلى أنه من المؤكد أنّ مستويات الأكسجين تؤدي دوراً هي الأخرى.

كثيراً ما تكون السحالي المعاصرة التي تحيا في المرتفعات ولُودة، أي تتصف بالولادة الحية. كما أنها تحمل البيوض في قناة الولادة لفترات طويلة من الزمن. وكان التفسير في كلتا الحالتين هو أنها تفعل هذا لتحافظ على درجات حرارة مرتفعة نسبياً في بيئة يمكن أنْ تكون فيها درجات الحرارة باردة جداً فتبطّئ النمو. لكن كلا هذين التكيُّفين يمكنهما أنْ يقللا الزمن الذي يكون فيه الجنين مطوّقاً في محفظة تخفض بحد ذاتها سرعة اكتساب الأكسجين أو أنهما يلغيان هذا الزمن تماماً. ولا يمكن حمل البيوض الكلسية في الأم لأنها لا تسمح بدخول الأكسجين إلى البيضة إلى أنْ تخرج من الأم.

إذن، لدينا لغز. تبدي الزواحف أربعة أنواع مختلفة من التكاثر: الولادة الحية، والبيوض الرِقّية التي يتمّ تحملها الأم لفترات زمنية مطولة، والبيوض الرِقّية التي تُباض بعد تكوينها في الأم بوقت قليل، والبيوض الكلسية. وبعد الولادة هناك عدد من الاحتمالات: البيوض قد تدفن أو لا تدفن، وعندما لا تدفن البيوض فقد يرعاها الأبوان أو لا. ولا نزال نجهل مميزات كل واحدة من هذه الطرق والوقت الذي ظهرت فيه أول مرة.

ولدينا لغز ثانٍ. فمعظم بيوض الديناصورات المعروفة هي من الطباشيري، وكما أشرنا سابقا، هي بشكل رئيس من الطباشيري المتأخر وهي متكلسة، كما أنّ سلوك طمر البيوض لدى الديناصورات هو من مميزات الطباشيري المتأخر أيضاً. ولكن، ماذا عن

ديناصورات ما قبل الطباشيري؟ بينما توجد بيوض من الصوروبودات وسحليات الورك ذات القائمتين من الجوراسي المتأخر - وأجملها من ترسبات في البرتغال، حيث تحتوي البيوض على عظام الأجنّة - تكاد تكون الصخور الأبكر خالية من بيوض و/ أو أعشاش الديناصورات. ويوجد قليل فقط من البيوض التي يُعرف عنها بالتأكيد أنها من الترياسي.

ويبقى زمن تطور هذه الأنواع المختلفة من البيوض للمرة الأولى لغزاً. ففي عام 2005 طرحت فرضية مفادها أن البيوض المتكلّسة ظهرت أول مرة عند نهاية البرمي كتكيف لاجتناب الجفاف في ظروف تزايد جفاف المناخ عالمياً في البرمي المتأخر وإلى الترياسي ضمناً. ولسوء الطالع، لا توجد دلائل أحفورية تدعم هذه الفرضية، إذ لا توجد بيوض برمية معترف بها على الرغم من وجود الأنابسيدات (المجموعة التي ستؤدي إلى نشأة السلاحف) والديابسيدات (المجموعة التي ستؤدي إلى نشأة التماسيح والديناصورات) والسينابسيدات (المجموعة التي ستؤدي إلى نشأتنا) في ذلك الوقت. وإضافة إلى ذلك، لا يُعرف سوى عدد قليل من بيوض الترياسي المتأخر التي قد تعود إلى الديناصورات. ولكن هذا يشكّل معضلة عظيمة: بيوض الديناصورات المحفوظة بشيوع في رسوبيات الطباشيري غير موجودة في ذات الأنواع من البيئات الترسبية في طبقات العصرين البرمي والترياسي. وعلى الأرجح، لو كانت الأركوصورات قد استخدمت البيوض القاسية في البرمي أو الترياسي (إذا كانت أي مجموعة من الزواحف قد استخدمت البيوض القاسية آنذاك)؛ لكنّا وجدناها بالأصل.

إنّ غياب الدليل أداة خطرة على الدوام، لكن في النهاية لابدّ من قبول الأعداد. وتشير جميع الأدلة إلى أنّ البيوض القاسية لم تكن شائعة الإنتاج بواسطة الكائنات الحية البرية البيوضة فيما قبل الطباشيري. وحتى اكتشاف بيوض ديناصورية قاسية في عام 2012 في جنوب إفريقيا صار مجرد استثناء وحيد للقاعدة. ومن الصعب أن نرى الكيفية التي يمكن بها للاكتشافات في المستقبل، مهما كانت كثيرة، أن تقلب هذه النزعة.

يُعرف شكلان فقط من بيوض الديناصورات: المستديرة، والمتطاولة. ولكن يميّز الآن سبعة من الطرُز المختلفة من ترتيب البلورات التي تتشكّل قشرة البيضة منها. وسيكون هذا التنوّع في مورفولوجيا جدار البيضة مدهشاً إنْ كانت جميع الديناصورات قد تطورت من سلف وحيد واضع للبيوض. ولكنه سيكون متوقعاً إنْ كان وضع البيوض قاسية القشرة قد تطور مراراً بواسطة سلالات منفصلة من الديناصورات. وإذا أضفنا مورفولوجيات قشرة البيوض الإضافية (والمختلفة) الموجودة في الزواحف والطيور المعاصرة، فهناك اثنا عشر

مركباً منفصلاً من البنى المجهرية لقشرة البيوض التي تطورت في أثناء التاريخ الطويل الآن للزواحف والديناصورات غير الطيرية والديناصورات الطيرية الحقيقية: الطيور.

ربما كان كل واحد من هذه الطرز تكيفاً لنوع مختلف من الشدائد الذي تتعرض له في العادة بيضة تابعة لمجموعة معينة أو نوع معين: فمثلاً بيضة سلحفاة في وكر عميق تواجهها مجموعة تحديات مختلفة جداً عن تلك التي تواجهها بيضة طائر أبي الحنّاء في عشّ مرتفع على شجرة. ولكن من الإمكانات الأخرى، هو أنّ البيوض الكلسية المختلفة دليل على تاريخ تطوّري مستقلّ، تطورت خلاله البيوض القاسية بشكل منفصل في سلالات متعددة بما فيها سلالات الديناصورات.

مستوى الأكسجين «المثالي»

أحد الاكتشافات الجديدة الأكثر أهمية حول تطور كثير من السلالات المعاصرة من حيوانات اليابسة هو أنّ كثيراً منها أتى من فترة زمنية قصيرة نوعاً ما - في أثناء زمن ما في الباليوزويك Paleozoic (الحقبة الأولية) عندما كان الأكسجين أكثر ارتفاعاً من الآن. إنّ هذا صحيح في مجموعات كثيرة من الفقاريات الموجودة متضمنة الأعضاء الأوائل للسلالات التي مضت لتصبح سحالي وسلاحف وتماسيح وثدييات. ولكنّ الفقاريات البرية ليست وحدها التي تشير إلى هذه النزعة، إذ بدأت أيضاً كثير من اللافقاريات البرية بما فيها السلالات الأساسية لكثير من الحشرات والعنكبيات والحلزون في أثناء العصر الكربوني الذي يعود إلى أكثر من 300 مليون سنة. وتشير التجارب الحديثة من السنوات الخمس الماضية إلى أنّ هناك مستوىً «سحرياً» من الأكسجين يعطي أعلى سرعة نمو للأجنّة في كلّ بيوض الفقاريات البرية وبيوض الحشرات، وهذا الرقم هو 27 في المئة.

نحن اليوم عند 21 في المئة من الأكسجين في الغلاف الجوي. غير أنّ الدراسات المُجراة على التماسيح والحشرات تبيّن أنّ النمو المثالي يحدث عند تركيز قدره 27 في المئة. فالبيوض المحضونة في تراكيز أكسجين أعلى أو أدنى من ذلك تستغرق وقتاً أطول للنمو والتفقيس. وفي المستويات الأخفض من الأكسجين - وربما ليس مصادفة أنّ 10-12 في المئة التي حدثت في الترياسي المتأخر - كثير من البيوض أو معظمها لم تفقس قط، أو أنها تفقس بعد وقت طويل لدرجة تجعل احتمال عدم أكلها من قبل الحيوانات المفترسة آكلة البيوض منخفضاً حقاً. وإذا أضفنا الحرارة إلى المعادلة صارت قابلية النجاة

أقل من ذلك؛ لأنّ البيوض تحتاج إلى الثقوب لتسمح للأكسجين بالدخول. غير أنّ الماء يخرج من هذه الثقوب؛ فيزيد احتمال موت الجنين. وأسوأ تركيبة هي تركيز الأكسجين في الغلاف الجوي مقداره 10-12 في المئة في عالم أكثر سخونة وجفافاً معاً ممّا هو عليه الآن. ونحن نعرف وقتاً كهذا، وهو الترياسي المتأخر. وتلك المخلوقات الواضعة للبيوض في العصر الترياسي المتأخر كانت تواجه مصاعب كبيرة.

المشكلة هي أنّ الزواحف تطورت للمرة الأولى في عالَم مرتفع الأكسجين نسبياً: العصر الكربوني، عندما كان الأكسجين فوق 27 في المئة. وهذه الزواحف الباكرة كانت الرائدة في نشأة البيوض الرهلية Amniotic. ومع هبوط مستويات الأكسجين وارتفاع مستويات الحرارة عالمياً، ربما صارت بيوض الزواحف الأصلية أفخاخاً مميتة: لم يكن الأكسجين الذي قد ينتشر من خارج البيضة إلى داخلها كافياً، في حين كان كثير جداً من الماء ينتشر نحو الخارج. فيما يبدو أنّ الاستجابة المثلى للحرارة والأكسجين المنخفض (الذي ينخفض أكثر مع الحرارة) ستكون الولادة الحية. لذلك قد يكون ظهور الولادة الحية استجابة لانخفاض قيم الأكسجين العالمية في البرمي المتأخر. وعلى الرغم من العدد الهائل من عظام الثيرابسيد التي عثر عليها في جنوب إفريقيا وروسيا وأمريكا الجنوبية، فإنه لم يتمّ العثور مطلقاً على بيضة أو عش في هذه الصخور. ربما طورت الثيرابسيدات الولادة الحية بالأصل خلال هذا الوقت، وهي صفة استمرت في سلالاتها، الثدييات الحقيقية التي عثر عليها أولاً في نحو الوقت نفسه الذي ظهرت فيه الديناصورات الأولى على مسرح الأحداث.

قد يكون الأمر أنّ كثيراً من سلالات الديناصورات طورت البيوض الكلسية في الجوراسي المتأخر كاستجابة للأكسجين الآخذ بالارتفاع، وأنّ تكوين البيوض الكلسية التي تدفن بعدئذ لم يكن قابلاً للتطبيق في بيئات البرمي المتأخر عبر الجوراسي المتوسط ذات أكسجين الغلاف الجوي الأكثر انخفاضاً.

ربما حفّزت الظروفُ منخفضة الأكسجين ومرتفعة الحرارة خلال البرمي المتأخر والترياسي تطورَ الولادة الحية والبيوض الطرية، والتي لابدّ أنها كانت فعّالة في السماح بتحرك الأكسجين إلى داخل البيوض وثاني أكسيد الكربون إلى خارجها. فمن ناحية أخرى، حفّزت مستويات الأكسجين الأكثر ارتفاعاً (ودرجات الحرارة المستمرة بالارتفاع) في الفترة من الجوراسي المتأخر إلى الطباشيري تطورَ بيوض الديناصورات الخشنة ودفن البيوض في أعشاش معقدة.

إنّ النماذج المتباينة من الولادة الحية مقابل وضع البيوض، مثلها مثل مميزات الاستقلاب، هي من الأمور الأكثر أساسية بين جميع الميزات البيولوجية - ومع ذلك لم تحظ إلا باهتمام شحيح من قبل اختصاصيي البيولوجيا التطورية. وحلّ هذه المشكلة عن طريق معرفة زمن نشأة هذا النوع من استراتيجيات الولادة أو ذاك، وتوزع هذه الأنواع، يجب أن يكون موضوع أبحاث كبرى في المستقبل القريب، إلا أنها قد تكون مستحيلة الإجراء بسبب عدم حفظ البيوض الرقّية.

15

محيطات الدفينة: ما بين 200-65 مليون سنة مضت

يركّز معظم النقاش حول عالم الحقبة الوسطى (الترياسي والجوراسي والطباشيري) على حيوانات اليابسة فيه، خاصة الديناصورات. ولكن تغيرات كبيرة كانت تحدث في العالم البحري أيضاً، فقد صارت محيطات الحقبة الوسطى بشكل متزايد أكثر وأكثر شبهاً بالمحيطات المعاصرة مع مضي الحقبة الوسطى في المياه الضحلة، إلا أن حيوانات المياه متوسطة العمق إلى العميقة منها بقيت مختلفة جداً عن تلك في أيامنا هذه. ويوضّح هذا الأمرَ مقطعاً عمودياً من المياه الضحلة نحو العميقة، حتى قرب نهاية الحقبة الوسطى تماماً، أي في الطباشيري المتأخر. ونبين هنا الكيفية التي قد تبدو بها غطسة كهذه، رحلة بإمكانها أن تلخص مقداراً عظيماً حول فهمنا الحالي لما يمكن أن ندعوه محيطات «الدفينة» في الحقبة الوسطى.[1]

إنّ الغلاف الجوي الذي يقع محيطُ الدفينة تحته ويتفاعل معه يؤثر بشكل مهم في كيمياء أي محيط وبيئته الطبيعية.[2] فدرجة حرارة الغلاف الجوي واختلاف درجات الحرارة من القطب إلى خط الاستواء وكيمياء مياه البحر - بما فيه محتواها من الأكسجين الذائب فيها - جميعها أمْلَت شروطَ المحيطات والمخلوقات الموجودة فيها. والحقيقة الفيزيائية الحاسمة هي أنّ المياه الدافئة تحمل أكسجيناً أقلّ مما تحمله المياه الباردة. وخلال الحقبة الوسطى، باستثناء الخمسة ملايين سنة الأخيرة من العصر الطباشيري، كان الغلاف الجوي من القطب إلى خط الاستواء حاراً ورطباً. غير أنّ الحرارة بمفردها سبّبت انخفاض محتوى الأكسجين الإجمالي عما نجده في المحيطات هذه الأيام. وإذا ما ربطنا ذلك بانخفاض الأكسجين في الهواء؛ نستنتج مدى اختلاف محيطات الحقبة الوسطى وقلة ملاءمتها للحياة. ولن نتفاجأ إذا وجدنا أن الحياة الموجودة فيها قد تطورت بوسائل عديدة؛ لتتكيف مع هذا المحيط العالمي منخفض الأكسجين.

وبينما كان عالَم الحقبة الوسطى مختلفاً عما هو عليه الآن، غير أنه قد يبدو مألوفاً من ناحية واحدة. فمثلما أن المناطق المنخفضة للغلاف الجوي في عالمنا مأهولة بتنوع واسع وأعداد وفيرة من المخلوقات الطائرة، من الحشرات إلى الطيور إلى الخفافيش؛ كانت سماء الحقبة الوسطى أيضاً مكاناً للحركة والحياة. فقد كان الهواء ممتلئاً بتشكيلة

من الكائنات الحية الطائرة، بما فيها الحشرات، وإضافة إليها كانت فهناك مجموعتان مختلفتان بشدة عما نجده اليوم: البتيروصورات الضخمة (الزواحف) إضافة أيضاً إلى البتيروداكتيل الزاحف الأصغر والعديد من أنواع الطيور، وهذه الأخيرة كانت تتألف من أشكال مختلفة تماماً عن معظم طيور اليوم، مع أو من دون أسنان، وأخرى مع جناحين أو من دونهما.

كانت بحيرات ضحلة Lagoons واسعة من نوع تنتشر في معظم شواطئ الطباشيري. وتتشكل البحيرات الضحلة عندما يَفْصِل شكلٌ من أشكال الحواجز الشعابية المسطح المائي الداخلي عن المسطح الرئيس. وعادة ما تكون هذه البحيرات الضحلة أسخن وذات أكسجين أخفض مقارنة بالمحيط المفتوح. فالنواحي الضحلة من هذه البحيرات الضحلة كانت مأهولة بالأصداف والحلزونات التي كانت مشابهة تماماً لتلك الموجودة في البحيرات الضحلة المدارية وفي البيئة الساحلية للمحيطات المعاصرة، وفي كثير من الحالات تنتمي إلى المجموعات التصنيفية (مثل الجنس Genus) نفسها.

فعلى سبيل المثال، كانت الأصداف الناقبة والقواقع نابيّة الشكل Tusk Shells والمحار والأسقلوب وبلح البحر والودع والقواقع المخروطية والتريتون Tritons والحلزون Conchs والحلزون نفير Whelks والقنافذ البحرية (كلاً من المقيمة ذات السطح الكروي، القنافذ البحرية «النظامية» والناقبة أو القنافذ البحرية «غير النظامية» مثل دولار الرمل و«بسكويت البحر» اليوم). وكانت هناك أيضاً أشكال شوكية من جراد البحر والسلطعون. وبالإجمال، كانت الحيوانات «المعاصرة» قد تأسست جيداً في البحيرات الضحلة لمحيطات الطباشيري، فلم تكن لتتأثر إلا قليلاً نسبياً بالانقراض الجماعي الذي أنهى حقبة العمالقة، والذي بحلول الطباشيري المتأخر (قبل نحو 90 إلى 65 مليون سنة) كان يقترب أكثر فأكثر.

وفي المياه الأكثر عمقاً، تتغير أنواع الحياة، كما هي الحال في محيطاتنا، إلى أشكال متكيفة مع الترسبات الأنعم الموجودة في المياه الأعمق بخلاف الأنواع التي تعيش في بيئات رملية أكثر خشونة والخاصة بالمياه الأكثر ضحالة. فلابدّ من أن كثيراً من الحيوانات كان يدفن نفسه في القعر، بما في ذلك كثير من الأصداف التي مازالت موجودة اليوم، إضافة أيضاً إلى كثير من الأنواع التي تحفر أوكاراً. وكان الاختباء في الترسبات (ما استقر تحت الماء ونحوه من كدر) تكتيك نجاة رئيساً؛ لأنه في الطباشيري المتأخر تكيف كثير من أنواع الحيوانات المفترسة إما لكسر قواقع

الرخويات الموجودة آنذاك أو ثقبها. وكانت توجد أيضاً في المياه الضحلة للبحيرات الضحلة قطع كبيرة من حجارة الكلس القاسية التي تكونت بواسطة الكائنات الحية المكوِّنة للشعاب، مثل المرجان في يومنا المعاصر. وهذه الرُّقع عبارة عن شعاب بالغة الصغر كوّنت فيما بعد أشكال حذوة الفرس كما اليوم، مع كون المقدمة أو قوس حذوة الفرس نامية نحو الرياح السائدة.

وعلى مسافات أبعد عن الشاطئ وُجدت حواجز مرجانية Barrier reefs كبيرة نمت مباشرة للأعلى حتى سطح البحر. فهذه الجدران الضخمة كانت تقيس مئات إلى آلاف الأميال طولاً، نامية مباشرة عند حافة الجزر الكبيرة أو القارات عند النقطة التي يتحول فيها الرصيف القاري إلى المنحدر القاري والمياه العميقة. ولابدّ أنّ كلا جانبي متاريس الحواجز المرجانية كان موطنا لكثير من أنواع الأسماك، بما فيها الأسماك العظمية والأسماك الغضروفية مثل سمك القرش واللخم.

لابدّ من أنّ هذه الحافة الداخلية للحواجز المرجانية - مظهرها الإجمالي الكامل في الواقع - كانت شبيهاً مباشراً لما تبدو عليه كثير من الحواجز المرجانية في يومنا هذا، مثل الحاجز المرجاني العظيم في أستراليا. ومع ذلك، فهناك اختلاف رئيس هو أنه بينما توجد أنواع مرجانية تعيش على الشعاب اليوم، غير أنّ بناة هيكلها الرئيس لم تكن مرجاناً على الإطلاق.

إنّ البنى ثلاثية الأبعاد المقاومة للأمواج التي ندعوها الشِّعابَ كانت مجتمعاً رئيساً للحياة منذ العصر الأوردفيشي. كلها كانت ولا تزال تتألف من الكائنات البانية والكائنات الرابطة، إنها مماثلة لبيوت آجرية مصنوعة من «لبنات» مرجانية تكتنف قشرتها الطحالب والمرجان المسطح وملاط من جزيئات الكربونات. وربما التشبيه الأمثل بمدينة قديمة، حيث شُيِّدت فيها المباني على مرّ القرون وبقيت منتصبة لبعض من الوقت، ثم انهارت فيما بعد أو أنها تحطمت لكن حطامها بقي جزئياً وشيدت المباني الجديدة على الأنقاض القديمة. ومع الوقت، فقد سببت المباني الحجرية الضخمة جداً هبوطَ قشرةِ الكرة الأرضية المتوضّعة أسفل المدينة القديمة بشكل بطيء لكن على نحو قابل للقياس.

وهذه هي طبيعة الشعاب المرجانية: عبر القرون، ترتبط الشعاب الأضخم والأثقل بسطح شعاب موجودة سلفاً وتقوم بالبناء متنامية نحو الأعلى باتجاه أشعة الشمس في سباق الحياة أو الموت لتنمو أسرع من جاراتها. وينافس المرجان ليجتنب أن ينمو شيء فوقه؛ فيحجب عنه الشمس والمياه المفتوحة الواهبتين للحياة، إذ إنّ الشمس ضرورية

لملايين النباتات وحيدة الخلية النامية في كل بوليب Polyp، وتمنح المياهُ المفتوحة البوليبَ اللاحم غذاءه. وتسمح النباتات الصغيرة جداً لحيوانات المرجان ببناء هياكلها العملاقة، وفي المقابل تتلقى النباتات التي تدعى دواميات السياط Dinoflagellata موادها المغذية والحماية من الحيوانات المفترسة. وبهذه الطريقة تنفصل اليرقات المرجانية عن العوالق لتستقر على أي ركيزة غير حية وقاسية تعثر عليها، ثم تنمو باتجاه سطح البحر. وبوجود الحظ يمكن لليرقات المجهرية هذه أن تنمو ابتداءً من بوليب واحد إلى مئات الآلاف في مستعمرة عملاقة مفردة، ويمكنها العيش لقرون أو أكثر بهيكل كلسي في معظمه يصل وزنه إلى آلاف الأطنان. وعلى الرغم من أنه توجد مستعمرات مفردة عمرها الآن آلاف السنين أو حتى أكثر، فإن المستعمرات الضخمة تموت في النهاية. وبعد الموت تتفتت الهياكل المرجانية؛ فتنمو عليها كائنات مختلفة.

ولم تكن شعابُ محيطات الدفيئة في الطباشيري مختلفةً من حيث طبيعة عملية البناء والأشكال النهائية للبناء، غير أنّ مواد بنائها لم تكن شعاباً مرجانية على الإطلاق بل كانت شعاباً صدفية - تشكّلت بواسطة أصداف ضخمة لا تشبه أي أصداف تعيش حاليا. فقد كانت رخويات ذات مصراعين ولها أشكال غريبة دُعيت الروديستات Rudists، ومعظمها يشبه حاويات القمامة المنتصبة لها بغطاء يفتح ويغلق على قوقعة الصدفة أسطوانية الشكل. وبعضها قارب في حجمه تريداكنا Tridacna اليوم المعاصر، «الصدفة العملاقة» من المناطق المدارية في هذه الأيام. وبخلاف التريداكنا، التي هي مفردة، نمت الروديستات جنباً إلى جنب في نمط اجتماعي، كما يفعل محار بلح البحر Mussles حاليا المعاصر، حيث تزدحم لتغطي كل بوصة مربعة من الركيزة، حتى إنها تنمو فوق بعضها.

وكل أسطوانة ضخمة مشكلة لقوقعة القاع لصدفة الروديست المفردة تزدحم عمودياً بجانب الأخريات من نوعها، حيث تترتب جميعها على شكل رصيف صلب من مخاريط طولها من قدمٍ واحدة إلى قدمين [30-60 سم] وعرضها يصل إلى قدم واحدة [نحو 30 سم]، كل منها يعلوه لحم ذو ألوان رائعة يمتد إلى الأعلى نحو الضوء. ومثل المرجان، كانت أيضاً تتعايش مع كائنات بالغة الصغر، وهي نباتات وحيدة الخلية تحتاج إلى الضوء من أجل البناء الضوئي، وفي المقابل تزود الصدف بالأكسجين الوفير، إضافة إلى إزالة ثاني أكسيد الكربون والفضلات من أنسجتها. وبخلاف المرجان المعاصر الذي يحتاج إلى قرون ليصل إلى أحجام ضخمة، يستطيع الصدف أن ينمو سريعا جداً. وخلال سنة بعد أنْ تغوص نحو الأسفل تاركة العوالق

العائمة إلى قاع المحيط الضحل (من المحتمل أنها تحتاج الضوء لتستمر في الحياة لأن لحمها احتوى على نباتات دقيقة)، نمت للأصداف الصغيرة قواقع خارجية سميكة من الكربونات لتصل إلى الحجم الناضج خلال سنة أو أقل. وكانت تولد وتنمو بسرعة وتموت بسرعة في كثير من الأحيان، في حين كانت أصداف أخرى من نوعها تحط على قواقعها القاسية تنمو خانقة المباني غير المتحركة لكن الحية التي جثمت عليها. وبينما كان الهيكل المرجاني يحتاج إلى قرن من الزمن لينمو من فرد واحد إلى مستعمرة ارتفاعها وعرضها عدة أقدام، كان من الممكن أن تقوم الروديستات بالأمر نفسه خلال خمس سنوات على الأكثر.

كجميع الشعاب، فقد نمت شعاب الروديستات مباشرة وصولاً إلى سطح البحر. وعلى جانبها الخارجي المقابل للبحر تزايدت أعماق المياه بسرعة. وخارجُ الشعابِ المحيطاتُ المفتوحة الضخمة للحقبة الوسطى، وفي الطبقات السطحية لهذه المحيطات وفي قيعانها وُجدت مخلوقات أخرى منقرضة الآن.

لابدّ أنّ سطح هذه المحيطات كانت تجوبه أسماك القرش الكبيرة والزواحف العملاقة النازلة إلى البحر. وهذه الأخيرة تضمنت البليسيوصورات طويلة وقصيرة الرقبة، إضافة إلى الموزاصورات Mosasaurs الشبيهة بالسحالي. ومن المحتمل أنها عاشت كما تعيش الفقمة حاليا، تغطس من أجل الطعام لكنها بحاجة إلى العوم على السطح لأجل الهواء. وقد كانت أضخم بكثير من أي فقمة أخرى، أضخم من أي مخلوق آخر يحتاج إلى الخروج من الماء من حين إلى آخر ليستريح أو يتكاثر.

كانت القيعان الأعمق في محيطات الدفيئة مختلفة أيضاً عن تلك الموجودة في معظم المحيطات. في يومنا الحال البحر الأسود وحدُه مشابه لظروف القيعان الأعمق وحتى مناطق المياه المتوسطة الخاصة بمحيطات الدفيئة - بيئات دافئة مع قليل جداً من الأكسجين المذاب لكن لا تستطيع حتى معظم الأسماك العيش فيها. وكانت القيعان مكونة من الطين الأسود مثل قاع البحر الأسود. وحصر الطينُ كمياتٍ ضخمةً من المادة العضوية سوداء اللون. وكان الأكسجين قليلاً في مياه البحر في تلك الأعماق - قليلاً لدرجة أنه لا يمكن أن يُحدِث التفكك الطبيعي للمواد العضوية، أو أنه يجري بسرعات أقل بكثير مقارنة بما يحدث في قاع البحر المؤكسَج. فقد عاش مجتمع مختلف كلياً من الميكروبات ضمن البوصات القليلة الأولى من ترسبات القاع الطينية، إذ عاش على الكبريت ومن المنتجات الثانوية لتنفُّسها مركّبيْ كبريتيد الهيدروجين والميثان.

وفي أماكن قليلة من قيعان محيطات الحقبة الوسطى فقط كان من الممكن أن يوجد الأكسجين الكافي للحيوانات التي تتطلب كميات طبيعية من الأكسجين. ولكن في محيطات الدفيئة، تطور شكلان مختلفان من الرخويات خصيصاً لأجل الظروف منخفضة الأكسجين: أحدها، الرخويات ذات المصراعين التي عاشت في القيعان، والآخر، مؤلف من التنوع الضخم للرخويات رأسية الأرجل، الأمونيت، التي عاشت في العمود المائي لكنها تغذت من القاع.

انتمى أمونيت محيطات الطباشيري -الذي نحن بصدد رسم ملامحه هنا- إلى مجموعة ظهرت للمرة الأولى في الجوراسي الباكر، ظهوره المفاجئ في صخور من ذلك العصر يوحي أنّ الانقراض الجماعي الترياسي الجوراسي المدمّر الذي حدث قبل نحو 130 مليون عام من الطباشيري المتأخر فتح الباب لأنواع جديدة من الحيوانات متضمنة تصاميم جديدة من الأمونيت. والعثور عليها أحد الأمور الممتعة في البحث عن الأحافير، ولأننا - نحن الكاتبين المشاركين - أمضينا كثيراً من الوقت باحثين في الطبقات الحاوية على الأمونيت خلال العقدين الماضيين، كان لابدّ لذلك من أن يفرض نوعاً من التقييد على صداقتنا العظيمة. والكاتب المشارك وورد Ward كان يفتنه تماماً أقل أثر لأحفورة من الأمونيت. والكاتب المشارك كيرشفينك Kirschvink كان يسعى إلى البحث في المغناطيسية القديمة لاستخراج حتى ولو عينة ممتازة تصلح للعرض في متحف، ولم يتورّع عن ذلك حقاً.

إنّ المجموعة الأخيرة من الأمونيت التي بدأت في طبقات الجوراسي الأكثر قدماً واستمرت حتى محيطات الدفيئة التي نتناولها في هذا الفصل، ذات أهمية عظيمة ليس لأجل تاريخ الحياة فحسب، ولكن لعلم الجيولوجيا نفسه ولاستخدام الأحافير لمعرفة الوقت. وهناك أماكن كثيرة في العالم، حيث توجد طبقة بحرية من العصر الترياسي الأخير، تعلوها طبقة من الجوراسي. وفي بروزات كهذه يمكن لأحدنا أن يأخذ جولة عبر الزمن، وإذا كانت الطبقات مستمرة، فستكون جميع الأحداث الدراماتيكية في الترياسي المتأخر والجوراسي الباكر ظاهرة للعيان. وهذه الفترة من الزمن والحجارة التي تحتفظ بالأدلة على الانقراض الجماعي الترياسي العظيم، واحد من ما يدعى الانقراضات الجماعية الخمسة الكبيرة، وهو شرف لا يستحق أن يخلع على لإبادة الأنواع. ومع سَيْرك عبر شرائح الترياسي العلوية، ستكون أولاً في طبقة محشوة بالأحافير العائدة للمحار المسطح هالوبيا *Halobia*، ثم تنتقل إلى صخور أصغر عمراً فيها محار المونوتيس Monotis

الأكثر وفرة. لكن بعدئذٍ تختفي الأصداف، فقط على طول بضعة أمتار من الطبقة تاركة فاصلاً طويلاً من الصخور والوقت العقيمين - المرحلة الأخيرة من الترياسي، فترة ربما طولها ثلاثة ملايين عام تُعرف بمرحلة الرهتي Rhaetian.

وأخيراً، بعد هذه السماكة التي تخلو عملياً من الأحافير، تظهر فجأة مجموعة جديدة - الأمونيت. وبينما كان هناك أمونيت في الصخور الترياسية العلوية، غير أنه لم يكن قط وافراً. وبشكل أكثر شهرة عند ساحل لايم ريجيز Lyme Regis في إنجلترا وجنوبي ألمانيا وفي كثير من المواقع الأخرى في العالم بأسره، يظهر أمونيت الجوراسي الأكثر إبكاراً بأعداد هائلة، وعلى امتداد بضعة أمتار من الطبقة يتزايد تنوّعها أيضاً. وهذا ليس مثل الأصداف المسطحة من الترياسي، إذ كل ما تحصل عليه هو نوع واحد. وهذا الأمونيت الخاص بالجزء الأول من الجوراسي متنوع ووافر، وهذا يخبرنا بأنّ انخفاض الأكسجين الشديد قد انتهى أخيراً وحدث ارتفاع بطيء. غير أنّ الأمونيت لا يخبرنا بأنّ مستويات الأكسجين المشابهة لليوم قد حدثت بشكل مفاجئ. إنما يظهر الأمونيت لأنّ سطح بحار الجوراسي الباكر صار فيه نزر يسير من الأكسجين، فاستفاد الأمونيت من ذلك بالكامل. إنه فعل ذلك لأنه ربما كان من بين أفضل الحيوانات على الكرة الأرضية تكيفاً مع الأكسجين المنخفض، فاستفاد من ميزاته التنافسية لاستغلال المنفعة الإيكولوجية في محيطات الدفيئة في الجوراسي والطباشيري.

وبسبب التشابه الإجمالي للقواقع ذات الحجرات في الناوتيات Nautiloids والأمونيتات Ammonoids، نفترض أن أسلوب الحياة عند المجموعتين ربما كان متشابهاً. وتعيش النوتيولوس *Nautilus* اليوم في مياه عالية الأكسجة في معظم موائلها الطبيعية، إلا أن بعض موائلها في القيعان ناقصة التأكسج. فقد كانت هذه صفة غريبة جداً، لأنه معروف عموماً أنّ رأسيات الأرجل تحتاج إلى ظروف مرتفعة الأكسجين، لكن الأمر ليس كذلك في السلالة الوحيدة المتبقية من رأسيات الأرجل ذات الحجرات والقوقعة الخارجية: النوتيولوس. وهي صامدة ومقاومة جداً إذا ما أُخرجت من الماء، ويمكنها أن تبقى خارج الماء لعشر أو خمس عشرة دقيقة من دون أي تأثير سلبي. وعندما تكون في الماء، فإنها تكتسب الأكسجين من خلال واحدة من أضخم وأقوى الخياشيم الضاخة الأضخم على مر التاريخ، إذ تمرر أحجاماً ضخمة من الأكسجين على الخياشيم، فتوفر عدداً كافياً من جزيئات الأكسجين حتى في المياه منخفضة الأكسجين. فهذا الحيوان خير مثال على التكيف مع انخفاض الأكسجين. وقد أثبت عالم الحيوان البريطاني مارتن ويلز

Martin Wells هذا مؤخراً بعد أن قاس استهلاك الأكسجين في أنواع النوتيلوسات الحبيسة [في الأحواض الزجاجية] المختلفة في غينيا الجديدة. فعندما يواجه النوتيلوس الأكسجين المنخفض، فإنه يفعل شيئين: أولاً، يتباطأ أيضه كثيراً. ثانياً، بفضل قدرته الكبيرة على السباحة؛ فإنه يستطيع أن يعبر مسافات طويلة ليس بحثاً عن الطعام فحسب، ولكن عن مناطق المياه مرتفعة الأكسجين.

إنّ الظهور الجماعي لأحافير الأمونيت في طبقة الجوراسي الأدنى يوحي أنّ الأمونيت مصمم ببراعة ليستخلص أعظم قدر من الأكسجين من أدنى التراكيز الذائبة الدنيا من هذا الغاز النفيس. لذلك يحتمل أن مخططات جسم الأمونيت في الجوراسي عبر الطباشيري تطورت قرب الحد الترياسي-الجوراسي استجابة للأكسجين المنخفض عالمياً. وشمل مخطط جسمها الجديد (مقارنة بالأمونيتات التي ظهرت قبلها) حجرةَ جسمٍ أكبر بكثير نسبة للمخروط المقسّم إلى حجيرات (الفراغموكون) Phragmocone. وبسبب ذلك كان عليها أن تستخدم قواقع أرق، وهذا ما تطلب دروزاً Sutures أكثر تعقيداً. كما أنّ الدروز سمحت بالنمو الأسرع عن طريق زيادة سرعة إزالة سائل الحجرات من أجل تغيير قابلية الطفو. وكان الحيوان يقبع ضمن حجرة الجسم الكبيرة، وكان يستطيع الانكماش ليختبئ داخل حجرة الجسم، وكانت لهذا الحيوان خياشيم طويلة جداً مقارنةً بأسلافه.

لا نعلم إن كانت للأمونيت أربعة خياشيم (مثل النوتيولوس) أو اثنان مثل الحبار أو الأخطبوط المعاصرين. وغياب القواقع الانسيابية عند معظم أشكال الجوراسي الباكر يُشير بوضوح إلى أنّ هذه الحيوانات لم تكن قادرة على السباحة السريعة، ويرجح أنها كانت تعوم أو تسبح ببطء قرب السطح، مستخدمة قوقعتها المملوءة بالهواء مثل المنطاد.

بقي أمونيت العصر الجوراسي يتغير حتى الطباشيري في تفاصيله فقط، ثم بدأت تحدث تغيرات مذهلة في تصاميم القواقع. وبينما بقي كثير من التصميم الأصلي على الشكل الحلزوني المسطح (مثل قوقعة النوتيولوس)، أخذت أشكال قواقع أخرى بالظهور في الطباشيري، ولذلك فلنرجع إلى الغوص بين الأمونيت في محيطات الطباشيري المتأخر.

كان معظم الأمونيت بصرف النظر عن أشكاله يجوب القيعان بحثاً عن القشريات أو أي غذاء صغير آخر. وقد تعيش في البيئات نفسها أكثر من عشرة أنواع مختلفة من الأمونيت، لكل منها شكل قوقعة مختلف. وكان بعضها بالغ الصغر، لا يتجاوز قطره بوصة واحدة [2.5 سم]، في حين كان بعضها الآخر يصل قطره إلى ست أقدام [نحو

1.80 متر]. وكانت لأغلب تلك القاطنة في بحار الطباشيري أضلاعٌ سميكة متفرعة بطريقة معقدة أو درنات من نوع ما، وهي وسائل دافية (صلبة) تشهد بوفرة وكفاءة الحيوانات المفترسة الكاسرة للقواقع في محيطات الدفينة، وعلى الأغلب كان البليسيوصور والموزاصور المفترسَين الرئيسين لها.

وكان الأمونيت يشبه نوعاً ما الحبار العالق في قوقعة نوتيولوس. لنوتيولوس اليوم تسعون مجسا (لامسة) Tentacles، في حين أنّ الأمونيت كانت له إما ثماني أو عشر مجسات. وأنواع النوتيولوس حيوانات قمّامة Scavengers، في حين أنّ حبار اليوم وأمونيت الحقبة الوسطى كانا لاحمَين Carnivores يحتاجان إلى كائنات حية في غذائهما.

وكانت المجموعة الثانية من رخويات محيطات الدفينة هي الأصداف، ولم يكن اختلاف شكلها بغرابة الروديستات، لكنها بالتأكيد تختلف عن أي شيء يعيش اليوم. إنها كانت ما نسميه الأصداف المسطحة، المعروفة بالإينوسيراموس *Inoceramus*. وهي ذات قرابة بالمحار، وكانت على أنواع مختلفة، جميعها تتنافس على القيعان الطينية نفسها. فلم يكن أي منها قادراً على حفر جحور، بل كان عليها أن تستقر على القاع. وكان بعضها عملاقاً حقاً، ذا قواقع لوزية الشكل لها عروق لطيفة، وكان أطوال بعضها يتجاوز ثماني أقدام [2.4 متر] من مناقيرها إلى فتحاتها العريضة. وبخلاف أي صدفة اليوم، كانت قواقعها بسماكة الورقة نسبةً إلى حجمها، وكانت قواقعُها العلوية مزخرفةً أحياناً بشتى أنواع المحار والأسقلوب والحيوانات الأشنية والأسماك الهدابية القشرية والديدان الأنبوبية، إلا أنه غالباً ما عاش صدف الإينوسيراموس على القيعان وفي مياه البحر ذات تراكيز الأكسجين غير الكافية لعيش الرخويات «العادية» أو اللافقاريات الأخرى. وقد استخدم الكثير من زملائنا الجيوكيمياء ليفهموا بشكل أفضل كم كانت هذه الأصداف مختلفة عن ربما أي صدفة معاصرة. فالعمل الجديد الذي أجراه نيل لاندمان Neil Landman، من المتحف الأمريكي للتاريخ الطبيعي، بالتعاون مع اختصاصي الجيوكيمياء كيرك كوكران Kirk Cochran، بيّن ببراعة غرابةَ مجتمعات الحقبة الوسطى هذه.

إنّ مجرد النظر إلى أحجام الإينوسيراميدات Inoceramids مقارنة بالأصداف الأخرى يعطينا فكرة عن مدى غرابتها. وفي عالمنا المعاصر، قد يصل طول الأصداف الأضخم، التريداكنا (الأصداف العملاقة) الخاصة بالمناطق المدارية إلى ست أقدام [نحو 1.80 متر] من طرفها إلى طرفها الآخر، وفيها مئات من الأرطال من اللحم. ولكن الأصداف التي

تليها في الحجم، وهي المخرطمة Geoducks لا تتجاوز أطوالها قدماً واحدة ولا تحوي ما يزيد على رطل أو رطلين [نحو 450 إلى 900 غرام] من الأنسجة الحية. فبعض المحار يصل طوله أيضاً إلى قدم واحدة [نحو 30 سم]، لكن هذا نادر. غير أنّ الإينوسيراميدات تملأ الثغرة المشاهدة في أيامنا هذه بين التريداكنا العملاقة والمخرطمة الأصغر منها بكثير. وقد وُجد تنوع ضخم للإينوسيراميدات من البرمي إلى نهاية الطباشيري عندما انقرضت. وكانت محيطات الدفيئة هي البيئة التي ازدهرت فيها. وكانت تحتوي على الميكروبات التي سمحت لهذه الأصداف الكبيرة بالعيش على الميثان ومواد كيميائية أخرى تنز من قيعان محيطات الدفيئة الغنية بالمواد العضوية ومنخفضة الأكسجين، ولم تكن تقوم بترشيح غذائها من مياه البحر كما تفعل الأصداف المعاصرة.

والمنطقة الأخيرة من محيطات الدفيئة كانت منطقة المياه المتوسطة،[4] المناطق السفلية من المحيطات الأعمق من أن تصل إليها أشعة الشمس، وفي الوقت نفسه أعلى من القيعان الراكدة للبحار بمئات إلى آلاف الأقدام. وبيئة المياه المتوسطة الواسعة في محيطات اليوم هي الموئل الوحيد الأضخم على الكرة الأرضية، وهي مستعمَرَة من قبل شتى المخلوقات المتكيفة مع حياة لا تلامس على الإطلاق السطح وشمسه وغلافه الجوي، كما أنها لا تأتي على تماس مع قاع البحر. وتعتمد الحياة هنا على البقاء «في الوسط»؛ لأنّ المياه الضحلة الدافئة والقيعان الباردة الأعمق ستكون مميتة لهذه المخلوقات، من حيث الافتراس إلى شروط درجات الحرارة والأكسجين أو كل هذه العوامل. ومن ثمّ، فإنّ التكيفات لأجل اكتساب الطفو المحايد Neutral buoyancy والمحافظة عليه أساسية للبقاء والوجود. وفي محيطاتنا، أكثر القاطنين الضخمين شيوعاً في هذه المنطقة هم حبار المياه المتوسطة، وهي حيوانات طورت لمجسات طافية أو حويصلات ضمن أجسامها تملؤها الدهون أو مواد كيميائية أخرى مثل السوائل الغنية بالأمونيا التي تجعل الحيوان بكامله أخف من مياه البحر.

وكانت فرائسها صغيرة كأفراد لكن كميتها الإجمالية ضخمة، وكانت مؤلفة من حشد متنوع ووافر من الحيوانات الصغيرة العائمة التي تُعرف بمجملها بطبقة التشتيت العميقة Deep scattering layer (اختصارا: *DSL*) - بناءً على اكتشافها بواسطة بعض من أولى السونارات العالمية Sonar والمستخدمة في أربعينات القرن العشرين. وطبقة التشتت العميقة DSL هذه مؤلفة من عدد لا يُحصى من القشريات الصغيرة ومفصليات الأرجل الأخرى مثل مزدوجات الأرجل (أمفيبودا) Amphipoda ومتماثلات الأرجل (أيزوبودا) Isopoda إضافة إلى تنوع من الشعب الأخرى. ففي النهار تمتد هذه الطبقة الضخمة من الحياة - الممتدة ربما من ثمانمئة إلى ستمئة متر عمقاً - تمتد إلى مئات أو حتى آلاف الأميال في جميع الاتجاهات في مناطق المحيط البعيدة عن الشاطئ. ومع اختفاء ضوء النهار، تبدأ الطبقة بكاملها بالسباحة للأعلى باتجاه الأعماق الأكثر ضحالة، ومع الظلمة الكاملة تصل بلايين لا تُحصى من الأطنان من الحيوانات المؤلِفة لطبقة التشتيت العميقة إلى الأعماق الأكثر ضحالة والأكثر دفئاً والأكثر غنىً بالمغذيات - الأعماق المميتة في أثناء النهار لمفصليات الأرجل العصارية التي تؤلف الأغلبية الساحقة لحيوانات طبقة التشتيت العميقة بسبب الحيوانات المفترسة المُبصِرة مثل الأسماك والحبّار.

لدينا أدلة قوية تظهر أنّ هذا الأسلوب الجديد تماماً للحياة في البحار ظهر أول ما ظهر في الطباشيري. وقبل ذلك لم تكن هناك موارد غذائية تستحق المطاردة في منطقة المياه المتوسطة، ولذلك لم تكن هناك أنواع تقوم بالتكيفات الواسعة التي يحتاج إليها الحيوان الأضخم، ليس ليطفو طوال حياته فحسب، ولكن ليكون قادراً بطريقة ما على الهجرة مئات الأمتار نحو الأعلى عند هبوط الظلام كل ليلة ثم يعود ليستقر في الأسفل ثانية في أعماق أكبر كل صباح. ومع ظهور مفصليات الأرجل الخاصة بالمياه المتوسطة، قدّم التطورُ سريعاً حيواناتٍ قادرة على التغذي بها مستخدمة أنواعا جديدة من جهائز الطفو، لأنّ التكيف الأكثر أساسية كان وسيلةً من وسائل تحقيق انعدام الوزن في المياه المتوسطة.

وكانت اللواحم التي تطورت لتستغل هذا المورد تنتمي إلى الأمونيت بشكل رئيس، لكن أشكالها اختلفت اختلافاً كبيراً عن الشكل اللولبي المسطح التقليدي عند أسلافها، والتي تميزت بها الأنواع التي تعيش مباشرة فوق قيعان البحر. وكانت لأمونيت المياه المتوسطة قواقع مكنته من الطفو طوال حياته، كانت قواقعه غريبة لم تسمح له بأي نوع من السباحة السريعة. وحينما يصير في كتلة مياه المحيط السميكة أو الطبقة السائلة المأهولة بساكني طبقة التشتت العميقة، يصبح غذاؤه وافراً ولم يبق عليه إلا أن يبقى في الطبقة، يرتفع مع ارتفاعها ويغوص ببطء معها في أثناء النهار، لينعم بوجود غني بالطعام وخالٍ من الحيوانات المفترسة. لذلك، فإنه عاش حياةً عائمة بطيئة، وكانت هذه المخلوقات الغريبة في صميمها مثل مناطيد الهواء الساخن بجهيزة طفو في الأعلى موصولةً بسلّة ركاب صغيرة متدلية أسفل جهاز الطفو.

احتاج أمونيت المياه المتوسطة[5] إلى أن يتحكم في طفوه بكفاءة. نحن نعلم أنّ جهاز الطفو للنوتيولوس المعاصر لنا بسيط وبطيء العمل. ويحتمل أنّ الأمونيت على العموم استخدم حواجزه المعقدة مع الدروز الجميلة كجزء من جهاز طفوٍ أفضل بكثير، جهاز يستطيع أن يضخ الماء خارجاً أو يسمح له بأن يفيض عائداً بسرعة كبيرة جدا إلى حجرات مملوءة بالهواء عادةً كثقل الموازنة. ويدعى هذا الأمونيت الجديد من الطباشيري المتأخر بشكل غير رسمي بالأمونيت مغاير الشكل بسبب تغير شكل قواقعه عن الشكل الأصلي، وهو التصميم الملفوف تقليدياً للأمونيت من ظهوره الأول في العصر الديفوني إلى موته النهائي مع نهاية الطباشيري. وكانت تلك مخططاتُ جسمٍ لم يُعثر عليها من قبل أو منذ وجودها الذي امتد تقريباً إلى ستين مليون سنة، وعاشت حتى اليوم الذي قام به كويكب تشيكشولوب Chicxulub بحرق جميع الأمونيت نافياً إياه من الوجود.

وكان بعض الأمونيت مغاير الشكل يشبه قواقع الحلزون العملاقة. غير أنّ تلك القواقع كانت مملوءة بحجرات من الهواء، مع جزء واحد أخير طويل من القوقعة معلق في الأسفل يحتوي على الأقسام الرخوة من الأمونيت والـمجسات وكل شيء. بعضها الآخر كان يشبه مَشابِك أوراق عملاقة وكان بعضها ببساطة على شكل خطافات ضخمة. ولكن المخاريط المستقيمة الطويلة كانت أكثر الأشكال شيوعاً، وكانت النهاية المدببة من المخروط هي الحجرة التي تكوّنت أولاً، وبحلول عمر البلوغ كان بإمكان هذه المخاريط الرقيقة الطويلة أن تصل طولاً يبلغ ست أقدام [1.83 متر]. وكانت تتدلى عمودياً في الماء، وكانت رؤوسها ذات المجسات تتدلى إلى الأسفل وتحت أقسام الطفو ذات الحجرات من القوقعة. وأطلق عليها اسم باكوليت Baculites، ويحتمل أنها كانت اللواحم الأكثر شيوعاً على الكرة الأرضية في الطباشيري المتأخر.

ملأت أسراب هائلة من هذه الباكوليت أعماق المياه المتوسطة.[6] وكثيراً ما تُصوَّر في الجداريات واللوحات التي تمثل محيطات الطباشيري، وهي على الدوام مصوَّرة بشكل خطأ كأشكال طويلة شبيهة بالسهام تعيش أفقياً في الماء، مثل الأسماك والحبّار. ولكن هذا كان مستحيلاً. إنها كانت متدلية عامودياً، بحيث تتجه الأقسام الأبكر من قواقعها البالغة الصغر نحو الأعلى ورأسها الثقيل ومجساتها تتدلى نحو الأسفل. فلم تكن قادرة قطُّ على السباحة جانبياً أو حتى على الطفو جانباً. وبالنسبة إليها لم يكن هناك سوى الأعلى والأسفل. ومن المحتمل أنها كانت سريعة ببراعة، تندفع إلى الأعلى بسرعة مستخدمة الدفع النفّاثِ ثم تغوص ببطء عائدة نحو الأسفل. فالحيوانات المفترسة للباكوليت، وهي

غالباً من الأسماك وسمك القرش، لابدّ أنها كانت تُخدع المرة تلو الأخرى لدى قيامها بالهجوم الافتراسي الطبيعي، والذي في سياقه تحاول الفريسة عادةً الهرب عن طريق السباحة أمام الحيوان المفترس. غير أنّ المهاجمين لابدّ من أنهم رأوا تحركاً سريعاً نحو الأعلى للمخلوق العمودي الطويل، كالدمية المعلقة بخيطٍ، وهي تنقض نحو الأمام في الاتجاه الذي من المفترض أن تسلكه جميع الفرائس الهاربة الفطنة.

الثورة البحرية في الحقبة الوسطى

وفي أثناء الحقبة الوسطى اللاحقة حدث تبديل ثوري في حرس في البحار، وقد سمّاها اختصاصي بيولوجيا الأحافير غاري فيرميج Gary Vermeij، من جامعة كاليفورنيا في دافيس، ببساطة الثورة البحرية في الحقبة الوسطى.[7] فقد كانت عالماً اندفعت فيه الحيوانات المفترسة لتتطور دونما ضوابط.

إنّ مراقبة صديقنا وزميلنا غاري فيرميج، الضرير منذ الصبا الباكر، وهو «يرى» (فهو يصف العملية بهذه الكلمة) التكيفات المعقدة لتقوية قواقع الرخويات بعد الحقبة القديمة كانت كمن يراقب أصابع عازف البيانو في حفلة موسيقية: حركات معقدة سريعة للأصابع التي يبدو أنها صارت خالية من العظام وهي «تعزف» على مفاتيح الأشكال الكثيرة لقوقعة الحلزون. من الأشواك على البرج Turret إلى الشفة المسطحة مثل البشرة على فوهة الحلزون، فالاكتشاف اللطيف للحشوة الكلسية لمنطقة السرة الخطيرة نوعاً ما من القوقعة، إلى التمريرات السريعة على الأسنان الدقيقة، والتي مع ذلك تعطي متانة إضافية، على الجانب الخارجي لشفة فوهة القوقعة، هي أيضاً متسمكة. نحن نقوده إلى أدراج خزائن المتحف وهو يقودنا إلى البصيرة المتولدة لديه من حاسة واحدة هي حاسة اللمس.

وللمسّ ذاكرةٌ، لكن اللمس يؤدي إلى التبصر أيضاً، وكان اللمس فقط الذي أخذ عقل فيرميج الذكي نحو «رؤية» التزايد المستمر بالقدرة على كسر القواقع للحيوانات المفترسة التي تطورت جديداً فيما بعد البرمي، مقترنةً بالتطور المشترك لأطقم الدروع الكلسية المتحسنة باستمرار عند العواشب اللافقارية والحيوانات المفترسة الأصغر إلى تعميم نعرّفه الآن على أنه الثورة البحرية في الحقبة الوسطى.

واقتصر التصور في البداية على أنّ الافتراس بعد الانقراض الجماعي البرمي تحول باتجاه كسر القواقع - أي نحو وسائل جديدة لكسب اللحم الغني الذي كان موجوداً في حصون

كانت منيعة سابقاً، مثل قواقع الأصداف والحلزون وشوكيات الجلد وعضديات الأرجل الخاصة بالحقبة القديمة. ولكن هذا التصور توسّع لاحقاً.

فقد كانت تكيفات الفرائس لا تقل إثارة للإعجاب: فالأصداف التي اعتادت العيش فقط على قاع المحيط، أو تحته قليلاً طوّرت تكيفات لحفر جحور عميقة. وتسمى هذه الأصدافُ الجديدة الأصدافَ مغايرة الأسنان Heterdont clams (بسبب كثرة «الأسنان» في خطها الرزّي). فقد خضعت لتغييرات تشريحية كبرى عن طريق التحام جزء من ردائها بزوج من الأنابيب الميزابية (ما نسميه رقبة الصدفة). وتبقى هذه الأصداف الناقبة المجموعة الأكثر تنوعاً للأصداف - طيف كامل من الأنواع القادرة على الانطمار السريع في الرمال والطين والوحل. ولا يوجد سوى سبب وحيد لتقوم بهذا: الهرب من الافتراس. فالمكوث ضمن الترسبات بدل المكوث على سطحها لا يزيد بأي طريقة فعالية التغذي، لكنه يزيد على نحو ضخم احتمال النجاة. وقام الآخرون بتغيير جذري في الشكل ليسمح بنمط حياة ناقبة (أو حفر الخشب) بما فيها الحلزون وأنواع جديدة من الديدان عديدة الهلب Polychaete وبعض أنواع السمك وأنواع جديدة كلياً من قنافذ البحر.[8]

وهناك مجموعة أخرى من اللافقاريات كانت تبدي إبداعات جذرية هي طائفة شوكيات الجلد Class of echinoderms التي تدعى زنبق البحر[9] Crinoids. وهذه اللافقاريات الضخمة الشبيهة بالزهر (تدعى بالعامية زنبق البحر Sea lilies) كانت نموذجية للحقبة القديمة بأنها كانت ثابتة، أي مثبتة في القاع: لم تستطع قطُّ التحرك خلال حياتها بعد سقوطها واستقرارها في مرحلة اليرقة العوالقية Planktonic larva، حيث ارتبطت بالقاع. وقيادة السيارة عبر مناطق الغرب الأوسط للولايات المتحدة اليوم يقدّم دليلاً قاطعاً على وفرتها السابقة: فكل طريق يمر في وادٍ جدرانه مصنوعة من صخور تتكون بكاملها تقريباً من «عظيمات» Ossicles مستديرة دقيقة تؤلف الساق الطويلة لزنابق البحر الثابتة. وللوصول إلى مثل هذه الوفرة كان لابدّ من أن يكون هناك محيط واسع وضحل وصافي المياه بشدة ودافئ، قاعُهُ مغطىً بغابة من زنابق البحر. ومن المشكوك به أنّ الشمس تستطيع النفوذ إلى هذه القيعان الضحلة والتي لابدّ من أنها كانت مريحة لزنابق البحر، طعامها عبارة عن عوالق مجهرية وهي تعيش على «الخط البطيء»، على الأقل من حيث أيضها. وحينما ترتبط؛ فهي لا تستطيع الحركة أبداً، وإذا انفصلت بسبب عاصفة أو حيوان مفترس فإنها تموت سريعاً.

لا شيء يحفز التطور الجديد أكثر من الموت الجماعي. فقد مسح الانقراض البرمي زنابق البحر عن وجه كوكب الأرض بصورة شبه كاملة. ووفق القوانين الجديدة للحقبة الوسطى الغنية بالحيوانات المفترسة، صارت زنابق البحر وجبات سريعة لأي مفترس مصمّم ليستخرج بعضاً من نوع الطعام من زنبقة البحر - وهي مهمة صعبة إذ لا يوجد على الغالب كائنات حية يحمي فيها هيكل كربونات الكالسيوم بهذه الضخامة لحماً بهذه القلة. غير أنّ زنابق البحر الثابتة انبثقت عنها مجموعة جديدة لا ساق لها من زنابق البحر، وهذه موجودة حتى يومنا الحاضر، وهي من أجمل الأحياء المُشاهدة في الشعاب المرجانية المعاصرة. إنها قادرة على السباحة في الواقع، ولو ببطء وبجلال عظيم مستخدمة سواعدها لدفع نفسها عبر الماء بلطف.

ولم تقتصر الثورة البحرية للحقبة الوسطى على الحيوانات المفترسة والفرائس فحسب، بل شملت أيضاً تزايد استغلال الموائل الجديدة.[10] وتضمن هذا تطور أشكال تسمح بنقب (انطمار) أعمق فأعمق من قبل الأصداف والحلزون هرباً من الافتراس، إضافة إلى التزايد المستمر في عدد اللافقاريات الأخرى التي كانت تستخدم الترسبات للتغذي بها. ويمكن الاستدلال على هذه التغيرات من الزيادة في تنوع الأحافير الآثارية ووفرتها، وهي مشابهة لتلك التي وصفناها في فصل الانفجار الكامبري. وكانت النتيجة الصافية هي تعكيرا حيويا Bioturbation كاملا تقريباً لرسوبيات الحقبة الوسطى.

ولم تقتصر التغيرات الجذرية التي طرأت على الحيوانات على قاع محيطات الحقبة الوسطى وما تحته. فللمرة الأولى خلال وجود الحيوانات حدث استغلال لكامل عمود الماء من السطح إلى القاع. ولم يكن كثير من الأشكال المتطورة جديداً من الحيوانات، بل كانت طلائعيات (بروتوزوا) وحتى عوالق نباتية طافية وحيدة الخلية. وعُثِر على مجموعات جديدة مهمة من الأحافير المجهرية في طبقات الحقبة الوسطى، متضمنة تطور تنوع ضخم من الفورامينيفرا Foraminifera الشبيهة بالأميبا ولكنها ذات هياكل، والتي عاشت على القاع أو كانت تطفو فوقه على أعماق مختلفة. والعوالق الأخرى كانت الراديولاريات السيليكونية Siliceous Radiolaria. والتغير الجذري الأكثر عظمة في عوالق الحقبة الوسطى وبعدها هو تطور مجموعة من الطحالب تدعى البذيرات الجيرية Coccolithophorids - والتي إذا تراكمت هياكلها بالغة الصغر على قاع البحر وتحجرت، تصبح مادة الطباشير المعروفة جيداً.

إنّ البذيرات الجيرية Cocooliths نباتات بالغة الصغر عليها 6 إلى 12 صفيحة مجهرية من كربونات الكالسيوم محدودة بالقسم العلوي من أجسامها الكروية نوعاً ما. وتتساقط هذه الصفائح الدقيقة بعد موتها إلى القاع وتتراكم بأعداد لا تحصى إلى أن تكونت الوحدات الرسوبية الضخمة كالجروف البيضاء الشهيرة White Cliffs في دوفر. وكامل الإطار الشمالي لأوروبا مبطن بمثل هذه الجروف، من بريطانيا إلى فرنسا وبولندا وبلجيكا وهولندا وعلى طول إسكندينافيا والجزء الأكبر من الاتحاد السوفييتي السابق على كامل الطريق جنوباً إلى البحر الأسود. وقد أدت البذيرات الجيرية دوراً كبيراً في درجة حرارة كوكب الأرض. فالبذيرات الجيرية بيضاء اللون، وهذا البياض يعكس أشعة الشمس نحو الفضاء من جديد، وهذا بدوره يبرّد الكرة الأرضية.

وتماماً كما في الانفجار الكامبري، الذي حُفّزت فيه الحيوانات لإنتاج أنواع جديدة من مخططات الجسم استناداً إلى أجهزة التنفس، حُفّزت حيوانات بحار الترياسي ليظهر عندها كثير من التكيفات الجديدة. وكما رأينا، فإنّ حيوانات اليابسة جرّبت شتى أنواع الرئات، وحدث نمط مشابه من الاستكشاف في المحيطات. وكانت الرخويات ذات المصراعين إحدى المجموعات التي طورت نوعاً جديداً من مخطط الجسم، بل وفيسيولوجيا جديدة استجابة للامتداد اللامتناهي تقريباً من القيعان الغنية بالمغذيات والفقيرة بالأكسجين.

إنّ قلة الأكسجين -بالذات- على القيعان جعلتها من جانب واحد أماكن رائعة للعيش فيها. وكميات ضخمة من الكربون المُختزل على شكل عوالق وكائنات حية أخرى نافقة سقطت إلى أرضية البحر ودُفنت هناك. وعلى قاع مؤكسج تُستهلك هذه المادة بسرعة من قبل كائنات حية تتغذى بالترشيح أو بالرواسب والكائنات القمّامة. غير أنّ ظروف قلة الأكسجين أبعدت هذه الكائنات، وحتى الجراثيم التي تحلل بالعادة المخلوقات الميتة على قاع البحر لم تكن موجودة. وكما رأينا، فهذا سبب واحد للهبوط السريع في مستويات الأكسجين في الترياسي. ولكن الأصداف وجدت حلاً لنفسها. وبعض أشكالها مثل أصداف الإينوسيراموس الموصوفة سابقا التي عاشت على أرضيات القيعان التي كان فيها بعض الأكسجين على الأقل، لم تكن تتغذى بالعضويات المتساقطة، وإنما بالميثان الآتي من جزء من الترسبات الغنية بالعضويات. والكائنات مولدات الميثان Methanogens مجموعة من الجراثيم تزدهر في الظروف منخفضة أو عديمة الأكسجين، وإذا تعمقنا بضعة سنتيمترات في الترسبات على قاع البحر الذي فيه بعض من الأكسجين فإننا نصل إلى منطقة خالية من الأكسجين - وبذلك تسمح بوجود مولدات الميثان. وهي تطلق خلال استقلابها الميثان كمنتج ثانوي. ويحتمل أن تكون الأصداف محتوية على جراثيم أخرى في خياشيمها كانت قادرة على استثمار الميثان أو مواد عضوية ذائبة أخرى، أو أنها ببساطة كانت تتغذى بالجراثيم. وتوجد اليوم آلية مشابهة نوعاً ما في حيوانات النفاثات البحرية العميقة، حيث تستخدم الديدان الأنبوبية العملاقة والأصداف هذه المواد الكيميائية طعاماً لها. ولكن الاختلاف هو أنّ حيوانات المصارف المعاصر مؤكسَج، والحيوانات هناك في الأسفل لا تحتاج إلى خياشيم، ولم تكن أصداف الحقبة الوسطى محظوظة مثلها.

وطوّرت القشريات مخططَ جسمٍ آخر مختلفاً تماماً استجابة للمحيطات التي تميزت بعوز حرج في الأكسجين: السلطعون Crab، وجراد البحر Lobsters. وبينما كان الشكل الإجمالي للجسم الشبيه بالجمبري Shrimp في القشريات موجوداً في صخور الحقبة الأولية، فإن السلطعون اختراع جديد نسبياً. والسلطعون ببساطة شكل شبيه بالجمبري مع طوي البطن تحت الجسم. والتحام الرأس بالصدر مشكلاً درعاً ثقيلاً وصفيحةً متكلسةً يجعلُ السلطعونَ فريسة صعبة للحيوانات المفترسة. ووضع البطن أسفل هذه الصفيحة الدرعية تصميم عبقري؛ فالمناطق البطنية هي الأكثر عرضة للإصابة في أي هجوم افتراسي، ومع إزالة هذه الثغرة في درعه ترقّى السلطعون سريعاً ليصبح من الكائنات البحرية البارزة. وتسمح مخالبها الكبيرة لها بكسر وفتح قواقع الرخويات من بين الفرائس الأخرى - وهي تُعرف بأنها آكلات الأطعمة القاسية Durophagous، أو المفترسات الكاسرة للقواقع. وقبل ذلك، فإن القليل من الحيوانات المفترسة كانت قادرة على اقتحام الكائنات الحية ذات القواقع، واستطاع السلطعون وكائنات أخرى اختراع الوسائل الملائمة.

وهكذا، فإن السبب المقبول لمخطط جسم السلطعون بكل مبتكراته يتعلق بالدفاع (طوي البطن وتسمك منطقة الرأس الصدري وازدياد تكلسها) وبالهجوم، تطور فكين قويين. وإليكم سببا آخر: كان تصميم السلطعون جزئياً تكيفاً أولياً من أجل زيادة الكفاءة التنفسية عن طريق وضع الخياشيم في فراغ ذي غلاف تحت الرأس الصدري، ثم تطوير مضخة لتحريك الماء على الخياشيم التي صارت مغلفة. إنّ تصميم خياشيم السلطعون طريق بديع لزيادة تمرير الماء على الخياشيم.

تطور السلطعون من كائنات شبيهة بالجمبري، وفي هذه الأسلاف يمكننا أن نرى تقدماً باتجاه نظام خياشيم السلطعون. ففي الجمبري تكون الخياشيم مغلقة جزئياً أسفل الحيوان. وبينما تكون الخياشيم مغطاة من جهة الظهر، فإنها تكون ملحقةً بقطعٍ ومفتوحة للماء من تحت.

لقد تغيرت محيطات الدفيئة في الحقبة الوسطى عبر الزمن. ومع ذلك، فإن اثنين من ملامحها الأكثر تميزاً، وهما الأمونيت والإينوسيراميدات ذوات المصراعين، كان من الممكن أن يبقيا حتى أيامنا لولا اليوم المشؤوم قبل نحو 65 مليون سنة، عندما محا كويكبُ تشيكشولوب أحياءَ الحقبة الوسطى عن وجودها المميز.

16

موت الديناصورات: قبل 65 مليون سنة

كُتّاب الخيال العلمي العظماء هم أحياناً خير من يستطيع تلخيص الماضي. والبكم أفضل وصف للانقراض الجماعي الأشهر، ألا وهو الانقراض K-T الطباشيري الثالثي الجماعي، كما قلنا في المقدمة، نحن نفضّل استخدام هذا المصطلح القديم. كم ابتهجنا حين اكتشفنا هذا الوصف الرائع في كتاب للكاتبين الشهيرين وليام جيبسون William Gibson وبروس ستيرلنغ Bruce Sterling، هو كتاب محرك الاختلاف *The Difference Engine*:

> «عصفت الكوارثُ بأرض العصر الطباشيري، فثارت الحرائق الهائلة وتناثر فتات المذنبات عبر الأجواء الكدرة لتحرق وتقتل أوراق الأشجار والنباتات الذابلة، إلى أنْ وقعت الديناصورات القوية المتكيفة مع عالم تحطم الآن، في الانقراض الجماعي؛ فانطلقت آليات التطور الواثبة بشكل فوضوي لإعادة إعمار الكرة الأرضية المتصدعة بفصائل جديدة من الكائنات.»

كما نعلم جميعاً، تضمّنت هذه «الفصائلُ الجديدة من الكائنات» الأنواعَ الكثيرة من الثدييات التي تعيش على الأرض حاليا. ومع ذلك، فكيف عرفنا وتأكدنا من أن كويكباً كان هو سبب انقراض الديناصورات؟ صارت هذه «الحقيقة» هي السائدة منذ نحو عام 1990، أي بعد عشر سنوات منذ نشرت مجموعة ألفاريز من جامعة كاليفورنيا في بيركلي اكتشافاتها المذهلة التي غيّرت تماماً فهمَنا ليس للانقراضات الجماعية فحسب، لكن أيضاً للعمليات الجيولوجية على وجه العموم.

كانت دراسة الانقراضات الجماعية متشابكة ومندمجة في صميم نسيج ميدان الجيولوجيا منذ انبثاقه، في فترته الباكرة الأكثر عطاءً التي استمرت تقريباً بين سنة 1800 وسنة 1860. فقد كان هناك جدال لعقود حول المبادئ الأكثر أساسية التي سمحت بتفسير كيفية ظهور المواد والتشكيلات الجيولوجية وكذلك أنواع الحيوانات والنباتات الموجودة على الأرض. وكان الصراع بين من يدعمون مبدأ الوتيرة الواحدة باعتبار أنّ

الحاضر هو مفتاح لفهم الماضي من جهة، وبين مجموعة مؤيدي مبدأ الكارثية من جهة أخرى. ومن أهم مؤيدي هذا المبدأ الأخير العالمُ الذي أول من أدرك حقيقة الانقراض، البارون جورج كوفييه Baron Georges Cuvier في فرنسا ما قبل الثورة وما بعدها مباشرة، ومن قبل تلامذته بعده وأهمهم كان ألسيد دوربيني Alcide d'Orbigny الذي كانت مساهمته الباقية في علم الجيولوجيا هي تطوير وحدات الزمن الجيولوجي ثم تحديثها. ولكن في مساهماتهما العلمية لجأ كوفييه ودوربيني إلى التفسيرات الغيبية للدلائل المدهشة على الانقراض الجماعي الذي اكتشفاه في دراساتهم الباكرة للسجل الأحفوري. واعتقد كلاهما أنّ عوامل غيبية عليا أطلقت بين حين وآخر فيضانات غمرت العالم ومحت معظم الحياة عنها، ثم أعادت إعمار المحيطات واليابسة بعد للفيضانات.

كانت ثقة الأجيال الجديدة من الجيولوجيين وعلماء الطبيعة تتذبذب بين مبدأ الوتيرة الواحدة ومبدأ الكارثية المعاكس له. وفي النهاية ربحت الوتيرة الواحدة؛ لأنّ التفسيرات الأكثر فالأكثر تفصيلاً للصخور ومميزاتها وأعمارها لم تبيّن أي دليل على أي فيضان غمر العالم كله، ناهيك عن علامات سلسلة من الفيضانات الضرورية لتفسير القائمة المتزايدة باستمرار للانقراضات الجماعية المؤكدة. وكانت هذه الانقراضات الجماعية من الأقدم إلى الأحدث هي الانقراض الأوردفيشي والديفوني والبرمي والترياسي والطباشيري الثالثي، والتي صارت تُسمّى الآن «الخمسة الكبرى». وبحلول القرن العشرين لم يعد أحد يعتقد بالكارثية، باستثناء بضعة كُتّاب غريبي الأطوار حاولوا تحقيق الربح من الناس الذين يأملون بأنّ الماضي كان أكثر إثارة من مجرد التراكم الممل لسجل الطبقات السميك ذرة تلو ذرة. ولكنّ أنصار الوتيرة الواحدة (بمن فيهم تشارلز داروين Charles Darwin) ظلت تربكهم ناحيةٌ واحدة للسجل الأحفوري، هي تفسير الانقراضات الجماعية.

فاستنتجت الجيولوجيا أنّ الانقراضات الجماعية كانت أحداثاً مهيبة وبطيئة جداً، وأنه إذا توفر الوقت الكافي، فحتى التغيرات المشاهدة في المناخ وحتى في مستوى المحيطات يمكنها أن تفسر انقراض كل تلك الأنواع في كل من الانقراضات الجماعية الخمسة الكبيرة التي يعترف بها جميع اختصاصييّ الجيولوجيا في النصف الثاني من القرن العشرين.

ولم يكـن هنـاك إلا بضـع صرخـات معارضـة (وكانـت قليلـة حقـاً)، وواحـد من أفضـل الاعتراضـات جـاء مـن أوتـو شـيندفولف Otto Schindewolf، أستاذ علم

الأحافير من جامعة توبينغن في جنوب ألمانيا. واعترض شيندفولف على صفتيْ البطيء والمهيب اللتين توصف بهما الانقراضات الجماعية. وعوضاً عن ذلك (بعد مسيرة مهنية طويلة لدراسة دقيقة لسجلّ الأحافير وتغيراته) طرح رأيا مفاده أن الانقراضات الجماعية نجمت عن أحداث ربما كانت أكثر كارثية وسرعة بكثير، ورأى أنه من الممكن أن تكون تأثيرات انفجار نجم مجاور كافية لتسبّب واحداً أو أكثر من الانقراضات الجماعية المعروفة. حتى إنه أعطى اسماً لهذه الرجعة إلى الماضي - فسمّاها الكارثية الجديدة Neocatastrophism، وقصد بذلك أنها ستكون طريقة بعيدة كل البعد عن الوتيرة الواحدة لتفسير الماضي.

لقد وقعت تخمينات شيندفولف على آذان صمّاء في مهنته. وكانت التغيرات البطيئة للمناخ والتغيرات البطيئة لمستوى البحر هي «الحقائق» - والأسباب المفترضة - للانقراضات الجماعية العظيمة. وبقي ميدان الجيولوجيا لثلاثين سنة، ابتداءً من عام 1950، هاجعاً وراضياً بفهمه بأنّ كل شيء يمكن تفسيره بأسباب أرضية عادية (وبطيئة). إذن، هكذا كانت الأوضاع المتعلقة بالانقراضات الجماعية اعتباراً من زمن تخمينات شيندفولف في خمسينات القرن العشرين حتى سنة 1980. بعد ذلك تغيّر كل شيء. في السادس من يونيو عام 1980، وهي الذكرى السادسة والثلاثون لبداية غزو الحلفاء لأوروبا بعملية الإنزال في نورماندي، غزت ورقةُ ألفاريز عن الكويكب المسبب للانقراض الجماعي الطباشيري الثالثي الصرحَ القديم الجليل لكن المترنح أصلاً للوتيرة الواحدة على وجه العموم، والأسباب المقبولة للانقراضات الجماعية على وجه الخصوص.[1] وكانت تلك هي الطلقة التي بدأت حرباً علمية تستمر في بعض نواحيها حتى اليوم. وقام عمل مجموعة ألفاريز بالإجابة عن هذا السؤال.

الاصطدامات والانقراضات الجماعية

يقدّم وجود العديد من فوهات الاصطدام على كل كوكب أو قمر ذي سطح صلب في المنظومة الشمسية دليلاً صارماً ومثيراً للإعجاب على تواتر هذه الأحداث وأهميتها، على الأقل خلال التاريخ الباكر لمنظومتنا الشمسية. فمن المحتمل أنّ الاصطدام خطر في معظم أو ربما جميع المنظومات الكوكبية خارج المجموعة الشمسية أيضاً. ويحتمل أن تكون الاصطدامات هي الأكثر تواتراً وأهمية من بين جميع الكوارث الكوكبية، إذ يمكنها

أن تغيّر التاريخ البيولوجي لكوكب بواسطة إزالة مجموعات مسيطرة سابقاً من الكائنات الحية فاتحةً بذلك الطريق إما لمجموعات جديدة كلياً أو مجموعات صغرى موجودة سابقاً. لذلك كانت لعمل ألفاريز في عام 1980 أهمية خاصة على كثير من الجبهات.

وكان أهم خطين من خطوط الأدلة المستخدَمَة لإقناع أغلب الباحثين في هذا الميدان بأن حدث الانقراض K-T (الانقراض الطباشيري الثالثي) نجم حقاً عن اصطدام هما: اكتشاف كلٍّ من قيم الإيريديوم المرتفعة ضمن الحدود الطينية، ووفرة «الكوارتز المصعوق» Shocked Quartz الممزوج بالإيريديوم. ومع حلول عام 1997 اكتُشفت تراكيز مرتفعة من الإيريديوم في أكثر من خمسين موقعاً من المواقع التي تحدد حدث الانقراض K-T في كل أنحاء العالم. ويُعتبَر الإيريديوم مؤشراً على الاصطدام لأنه نادر جداً على سطح الأرض، لكنه يُشاهَد بتراكيز أعلى بكثير مقارنة بكوكب الأرض في معظم الكويكبات والمذنبات. وتُعتبَر حبات الكوارتز المصعوق مؤشرات على الاصطدام؛ لأنّ تكوين الصفيحات المتعددة على الكوارتز بحجم الرمل، والتي يمكن العثور عليها في معظم مواقع حدود حدث الانقراض K-T، لا يمكن أن يُنتَج إلا بواسطة أحداث مرتفعة الضغط، مثل اصطدام كويكب ضخم بسرعة فائقة بصخور حاوية على الكوارتز. ولا تخلق أي ظروف «أرضية» طبيعية حبات كوارتز كهذه ذات صفيحات الصعق المتعددة.

وإضافة إلى الإيريديوم وحبات الكوارتز المصعوق، فقد تكشفت أيضاً مواقع حدث الانقراض K-T عن دلائل على حرائق هائلة لابدّ أنها حدثت بعد الاصطدام بقليل.[2] وعُثر على جسيمات دقيقة من السخام في طين حدث الانقراض K-T في كثير من أرجاء الكرة الأرضية. وهذا النمط من السخام ينتج فقط من النباتات المحترقة، وتقترح كميانه أنّ كثيراً من سطح الكرة الأرضية تعرض لحرائق الغابات والأشجار الصغيرة والأعشاب.

وعلى الرغم من أنّ البيانات التي تجمعت خلال ثمانينات القرن العشرين من علم المعادن والكيمياء وعلم الأحافير، والتي كانت في الأصل بيانات مختلفا على تفسيرها، أقنعت معظم الخبراء بأنّ مذنّباً ضخماً أو كويكباً ضخماً (قطره نحو 10-15 كم) ضرب كوكب الأرض قبل نحو 65 مليون سنة، إلا أنه في الوقت ذاته انقرض بشكل مفاجئ تقريبا أكثرُ من نصف الأنواع الموجودة على الكرة الأرضية آنذاك في حدث الانقراض K-T. وقد أدى اكتشاف فوهة اصطدام ضخمة عمرها يتوافق تماماً مع الحدث في منطقة يوكاتان Yucatán في المكسيك (فوهة تشيكشولوب) إلى القضاء على ما تبقى من المعارضة لفرضية الاصطدام.

وكان عامل الإبادة النهائي، تبعاً لألفاريز وفريقه، هو فترة من الظلام امتدت لعدة أشهر، أو العتمة Blackout كما يدعونه، بعد الاصطدام. ونجمت العتمة عن الكميات الهائلة من مادة النيزك والأتربة من الأرض التي تناثرت في الغلاف الجوي بعد الانفجار، واستمرت لزمن كافٍ؛ لأن يقتل معظم الحياة النباتية على الكرة الأرضية آنذاك، بما في ذلك العوالق. ومع موت النباتات اكتسحت المصائب والمجاعات جميع الكائنات صاعدةً عبر السلاسل الغذائية.

لقد قامت عدة مجموعات بحساب نماذج الإماتة Models of lethality الناجمة عن تغيرات كهذه في الغلاف الجوي. ويبدو أنّ كمية كبيرة من الكبريت قد قُذفت إلى الغلاف الجوي أيضاً. وتحول جزء صغير من هذا الكبريت إلى شكله الأصلي حمض الكبريتيك الذي سقط عائداً إلى الأرض على شكل مطر حمضي، ربما كان هذا آليةَ قتلٍ، لكن على الأغلب كان دوره كعامل تبريد أهم من دوره في القتل المباشر من خلال التحميض. إلا أن انخفاض وصول الطاقة الشمسية (بما يصل إلى نحو عشرين في المئة لثماني إلى ثلاث عشرة سنة) إلى سطح الأرض بسبب الامتصاص من قبل جسيمات الغبار في الغلاف الجوي (الأيروسولات Aerosols أو الهباء الجوي) كان سبب الأذى الأعظم الذي لَحِق بالبيوسفير. ويحتمل أن هذا كان كافياً لينتج عقداً من الصقيع أو درجات الحرارة القريبة من التجمد في عالم كان في وقت الاصطدام مدارياً بشدة. وقد أكد هذا تصريح ألفاريز الباكر بأن العتمة أدت دوراً في الانقراض الجماعي. ونجم الشتاء الطويل عن التزايد الشديد في محتوى الأيروسولات في الغلاف الجوي خلال فترة قصيرة من الزمن.

كما كان هناك بعد الاصطدام غبار، غبار كثيف.[3] ولابدّ أنّ التأثيرات المناخية العالمية لغبار الغلاف الجوي الناجمة عن اصطدام كويكب أو مذنب ضخم (بقطر 10 كم) ستتضمن عتمة طويلة الأمد (تستمر لأشهر) تكون مستويات الضوء خلاله أقلّ من تلك الضرورية للبناء الضوئي، ويرافق ذلك تبريد سريع لمناطق اليابسة. ولكن التكهن الأكثر خطورة في هذا النموذج هو تأثير الحجم العملاق لغبار الغلاف الجوي الناجم عن الاصطدام على دورة الماء، والذي لم يحظَ بالتقدير سابقاً. وانخفض متوسط هطول المطر عالمياً بأكثر من تسعين في المئة لعدة أشهر وبقي نحو نصف المعدلات الطبيعية فقط بعد سنة؛ أي إن العالم أصبح بارداً ومظلماً وجافاً. إنها وصفة ممتازة للانقراض الجماعي، خاصة للنباتات، وكذلك بالنسبة إلى المخلوقات التي تتغذى بالنباتات.

وأخيراً جاء الإدراك بأنه خلال ساعات بعد الاصطدام سيتساقط فتات من الصخور من السماء كالمطر وبسرعات عالية وقادمة عبر الغلاف الجوي من ارتفاعات قريبة من الفضاء الخارجي القريب التي رماها إليها التصادم، وكانت حرارتها كافية لإشعال النار في نباتات الكرة الأرضية. فقد نشأت حرائق الغابات التي ربما كانت الأكثر ضخامة في التاريخ على جميع القارات، وقد تكون عاملاً كافياً بمفرده لإبادة الديناصورات على اليابسة.

الانقراضات التمهيدية

من المعروف الآن أنّ ما يصل إلى 75 في المئة من كل الأنواع انقرض في حدث الانقراض الجماعي K-T (الانقراض الطباشيري الثالثي)، وكان من مميزاتها على اليابسة انقراض الديناصورات من جهة وظهور الثدييات من جهة أخرى. وفي البحر تميزت باختفاء الأمونيت في أواخر الطباشيري من الحدث، وظهور الكائنات البحرية التي تسود فيها الأصداف والحلزون في أوائل الباليوجين. ومع تحسن تأريخ العصور اكتشفنا أنّ «الانقراض الجماعي» عند الحدّ الطباشيري الباليوجيني أكثر تعقيداً بكثير مما يمكن أن تفسره نظرية الضربة الوحيدة الأصلية. نعرف الآن بوجود نبضتين على الأقل من الانقراض الجماعي «ما قبل حدث الانقراض K-T» قبل الضربة الأخيرة التي لا يزال حدوثها مثبتاً تماماً. فالأبحاث التي أجريت خلال السنوات القليلة الماضية تُظهر مرة أخرى أنّ تأثيرات فيضانات حمم البازلت البركانية كانت جزءاً من آلية القتل.

إن أحافير الديناصورات قليلة جداً، ولذلك فإنّ استخدامها لمحاولة معرفة سرعة انقراضها مستحيل تقريباً. إنّ سجلّ الأحافير ممتلئ بالأحافير المجهرية، ودراستها دعمت بقوة الادعاء القائل إنّ الانقراض المفاجئ نجم عن سقوط كويكب أو مذنب. ومع ذلك، فقد كنّا نريد معرفة مصير الأحافير الأضخم في كلّ اليابسة والبحر، وكانت رأسيات الأرجل من الأمونيت، والموصوفة في الفصل الماضي، مدروسة أفضل من غيرها من الكائنات.

إنّ المكان الأمثل لدراسة انقراض الأمونيت الأخير الذي عاش قرب الاستواء في عالم الطباشيري المتأخر هو عند البروزات في الطبقات المبطنة لخليج بيسكاي Biscay،

منطقة واسعة تمتد من جنوب غرب فرنسا إلى شمال شرق إسبانيا، وأفضلها على الإطلاق عند الشريط الساحلي الصخري قرب قرية ثومايا Zumaya القديمة في بلاد الباسك.[4] وتتموضع هناك مئات الأمتار من الطبقات المتكدسة التي يتراوح عمرها بين نحو 72 ونحو 50 مليون سنة وكأنها صفحات كتاب مفتوح. ويتموضع حدّ الانقراض الجماعي في خليج تحدّه الصخور، ويوجد حتى تغير في طبيعة الصخور ولونها يُميز هذا الحد الجليّ.

يعود تاريخ أقدم الصخور على طول الشريط الساحلي لثومايا إلى نحو 71 مليون سنة. وتتألف الطبقات من صفائح طبقات مفردة، سماكة كل منها نحو ستٍ إلى اثنتي عشرة بوصة [نحو 15 إلى 30 سم]، وكل صفيحة عبارة عن زوج: طبقة صخر كلسي أكثر سماكة وأخرى أرقّ منها من صخر قليل الكلس يُدعى المارل Marl. وتتكدس آلاف مؤلفة من هذه الأزواج فوق بعضها، وقد تحجرت منذ زمن بعيد مشكّلةً الشريط الساحلي الصخري. ومن نوع الصخور ومن الأحافير، نعلم أنّ الطبقات ترسبت في مياه عميقة نوعاً ما، في الجزء الأعمق من الرصيف القارّي، أو حتى فوق حافته، عند أعماق تتراوح بين مئتي متر وأربعمئة متر.

والطبقات مصفوفة بشكل متعامد مع معظم الشريط الساحلي ومائلة بانحدار شديد نحو الشمال. فالسير على طول الشريط الساحلي من الجنوب إلى الشمال يأخذك على الدوام إلى زمن أكثر حداثةً. غير أنّ الميل شديد الانحدار للصخور وشدة الفرق اليومي بين المدّ والجزر يجعلان الزيارة لجزء كبير من هذين البروزين ممكناً في أثناء الجزر فقط، والمشي صعباً جداً.

وفي بداية المسير، في الجزء الجنوبي من الشاطئ (أي بعيداً في الماضي أيضاً) اعتباراً من السلّم الطويل الذي هو المدخل الوحيد إلى هذا الموقع الصخري، نجد الأحافير موجودة في كل مكان. فمعظمها أصداف ضخمة، الإينوسيراميدات التي تناولناها في الفصل الماضي، غير أنه يوجد كثير من الأمونيت أيضاً، وليس القليل من قنافذ البحر، التي تبدو كالقلوب الكبيرة المحشوة. ولا توجد عظام فقاريات ولا أسنان أسماك القرش -ولا ديناصورات طبعاً- لكن هذه الطبقات البحرية لها نفس عمر الصفائح غير البحرية الموجودة حول العالم التي تحتضن واحدا من أعظم الحشود المعروفة للديناصورات.

وأكثر ما يثير الدهشة هو الإينوسيراميدات، إذ يصل قطرها حتى قدمين [61سم]، تشبه أطباقاً عملاقة متوضّعة جنباً إلى جنب مع نسخ لها أصغر منها - وهي في الحقيقة أنواع مختلفة. إنها موجودة في كل مكان وفي كل الصفائح على طول مئة متر من الطبقات المكدسة. وبسبب هبوط الصفائح، يمكن أن تصل مساحة سطوحها القابلة للفحص إلى مئات الأمتار المربعة. فالعثور على الأحافير أسهل في أعلى الطبقة أو عند أسفلها، وليس في أطرافها، وأفضل نتائج البحث تكون في أعلى سطوح الصفائح الواسعة. وفي ثوماياً يوجد كثير من هذه للاستكشاف والتجميع، لذلك فإنّ أعداد الأحافير كبيرة جداً لأيٍّ من الصفيحات الحاوية على الأحافير في أيٍّ من العصور. ولكنْ، بعدئذٍ تختفي الأصداف الكبيرة، ويحدث ذلك بعمق يزيد على مئة متر من أفق انقراض الأمونيت الموسوم جيداً. ويستمر كلّ من الأمونيت وشوكيات الجلد بوفرة حتى الحدّ الذي يختفيان عنده بشكل مفاجئ ودراماتيكيّ.

وتخبرنا الأبحاث المُجراة في الشريط الساحلي لخليج بيسكاي، إضافة إلى الأبحاث على الرسوبيات الأخرى من الطباشيري المتأخر، بأنّ الإينوسيراميدات ذات المصراعين نفقت تدريجياً قبل نحو مليوني سنة من الموت المفاجئ للأمونيت. وفي الحقيقة، فإن استخدام الطرق الإحصائية التي طورها تشارلز مارشال Charles Marshal من جامعة كاليفورنيا في بيركلي، بيّن مارشال والمؤلف المشارك وورد أنه وُجد على الأقل 22 نوعاً من الأمونيت في هذه المنطقة صعوداً حتى الطبقة التي تحتوي على الدليل الأكثر أهمية على الاصطدام: الإيريديوم والكوارتز المصعوق والكريات الزجاجية (التكتيت Tektites الذي هو فتات من الصخور التي قُذفت للأعلى بواسطة الاصطدام العملاق، ثم تحولت إلى كِسَر بالغة الصغر من الزجاج مع سقوطها عائدة للكرة الأرضية بسرعة مرتفعة).

إنّ الأمر المُحيِّر حول انقراض الإينوسيراميدات ليس أنها انقرضت قبل الأمونيت بفترة طويلة، بل إنّ انقراضها حدث في أوقات مختلفة في مناطق مختلفة. فمثلاً، إنّ الإينوسيراميدات الأخيرة الموجودة في صخور الطباشيري القطبية الجنوبية لا يزيد عمرها على 72 مليون سنة، أو قبل نحو سبعة ملايين سنة من انقراض الأمونيت. نحن نعلم الآن أنّ ذوات المصراعين ذات الانتشار العالمي هذه مُنيت بموجة من موت الأنواع مبتدئة أولاً في مناطق القطب الجنوبي ثم تحركت تدريجياً نحو نصف الكرة الشمالي. وكان تقريباً كمرض يتحرك شمالاً ببطء قاتلاً الأصداف بأسلوب تدريجيّ. غير أنّ هذا لم يكن مرضاً بل كان البرد والأكسجين.

قرب نهاية الطباشيري، بدأ نوع مؤكسَج من الدورة الحرارية الملحية Thermocline circulation بالظهور في خطوط العرض الجنوبية العالية، وخلال نحو مليوني سنة انتشرت مياه القيعان الباردة المؤكسَجَة إلى كل البحار، متحركة من الجنوب إلى الشمال. ووجودها وضع نهاية للأصداف التي ندعوها الإينوسيراميدات، وكان اختفاء هذه الأصداف نقطة انعطاف في تاريخ الحياة، فقد بقيت ناجحة جداً حتى ذلك الحدّ لما يزيد على 160 مليون سنة. ولكنها كانت متكيفة مع النوع الآخر من المحيطات، نوع مياه القيعان منخفضة الأكسجين والدافئة، فقتلها البرد والأكسجين.

الاصطدام فقط؟

نستطيع الآن تلخيص الفهم الحالي للحدث الأولي الذي يبدو أنه سبب الانقراض الجماعي الطباشيري الثالثي. وكانت هناك ضربة مذنب واحدة فقط، جاءت بعد فترة قصيرة (3-1 مليون سنة) من تغيّرين سريعَين في مستوى سطح البحر العالمي، واللذين أحاطا بدورهما بتغير كبير في كيمياء مياه المحيط.[5] وقد كوّن الاصطدام فوهة ضخمة (يصل قطرها إلى 300 كم) تُسمّى الآن تشيكشولوب، وهي متوضّعة في شبه جزيرة يوكاتان. وعلى الرغم من أنه لا يزال هناك جدل حول الحجم الحقيقي للفوهة، فإنه لا يوجد شك حول أن هذه البنية فوهة صدمة فعلاً. ويمكن أن تكون الطبيعة الجغرافية والجيولوجية لموقع الاصطدام قد ساهمت في تعظيم آليات القتل التالية للصدمة، ذلك أنّ وجود رواسب المتبخرات Evaporites الغنية بالكبريت في منطقة الاصطدام ووجود الكبريت في المذنب نفسه ربما ساهم في الإماتة التالية. ويبدو أنّ ضربة المذنب منذ 65 مليون سنة في منصة كربونات غنية برواسب المتبخرات، والمغطاة بحد ذاتها ببحر ضحل عند خط عرض استوائي، يبدو أنها أدت إلى عواقب فظيعة يصعب تخيلها: تغيُّر عالمي في غازات الغلاف الجوي، مترافق بانخفاض درجة الحرارة والمطر الحمضي (بشكل رئيس من الكبريت المشتق من المتبخرات في موقع الاصطدام) وحرائق عالمية هائلة، جميعها آليات قتل محتملة. ومعظم العلماء يوافقون أيضاً على أنّ الرواسب السميكة المتفككة بخشونة التي عُثر عليها في كثير من الأماكن على طول الساحل الشرقي للمكسيك تكونت نتيجة أمواج الاصطدام. ولذلك كان شتاء

الاصطدام المطول آلية القتل الأكثر أهمية، وقد نتج من إيروسولات متزايدة على نحو واسع في الغلاف الجوي خلال فترة قصيرة من الزمن.

ويشير نموذج آخر نشر حديثا يصف تغيرات الغلاف الجوي التالية للاصطدام إلى أنّ الارتفاع الحاد في مستويات الغبار المتولّد عن الانفجار في الغلاف الجوي قد يكون مميتاً أيضاً. فالغبار الناعم الناتج من الاصطدام بمنطقة في المحيط أو على القارة يفترض أن يؤدي إلى عتمة طويلة الأمد (عدة أشهر). فهذا الانخفاض في مستويات الضوء (أدنى من تلك الضرورية للتركيب الضوئي) كان لابدّ من أن يترافق مع تبريد سريع لمناطق اليابسة. وهذا الغبار لابدّ من أن يكون له أيضاً تأثير شديد في دورة الماء في العالم. وأشارت النمذجة المتقدمة للمناخ إلى أنه بعد الاصطدام الضخم ينخفض متوسط هطول المطر عالمياً بما يزيد على تسعين في المئة لعدة أشهر، ويبقى نحو نصف الطبيعي فقط مع حلول نهاية السنة الأولى التالية للاصطدام. وتأثيراته في الكائنات الحية صارت مثبتة جيداً.[6]

لكن ماذا عن بازلت الفيضان في مصاطب ديكان؟

إنّ الصفحات السابقة تبرهن على أنّ حدث الانقراض الجماعي K-T كان على نحو واسع انقراضاً جماعياً وحيد الحدث. فقد تلقت الكرة الأرضية ضربةً، فأدت هذه الضربة إلى تغيرات بيئية كافية للقضاء على أكثر من نصف جميع الأنواع الموجودة على الكرة الأرضية آنذاك. وتبقى هناك معلومة مؤرقة واحدة غير مُفسَّرة. إنّ الكويكب ضرب كوكب الأرض الذي كان بالأصل في وسط واحدة من الفترات الأكثر شدة خلال كامل تاريخ الكرة الأرضية من فيضانات البازلت بفعل نشاط البراكين. والحدث الذي سُمّي «مصاطب ديكان» Deccan Traps، سبّب انتشار أطنان لا تُحصى من البازلت لتتموضع على سطح الكرة الأرضية، من مصدر قادم من أعماق الأرض. ربما قبل 84 مليون سنة، انفصلت كتلة عملاقة من الصخور المصهورة من قرب الحدّ بين الوشاح واللّب لتبدأ رحلة نحو الأعلى استغرقت نحو عشرين مليون سنة. وفي طريقها نحو الأعلى، فمن المرجح أنّ هذه الكتلة من الصخور المصهورة تسببت في تعرض الكرة الأرضية لنوبة من انحراف القطب الحقيقي، وهي أحداث تقع عندما يحدث فقدُ توازن ضخم لدرجة أنّ التوازن الداخلي الذي تحكمه قوانين حفظ العزم Conservation of momentum في دوران

كوكبنا يؤدي إلى تحركات عظيمة في كتل اليابسة. ربما أخلّت هذه التحركات السريعة باستقرار بعض البيئات. فعلى سبيل المثال، يبدو أنّ جزءاً كبيراً من كندا الغربية وألاسكا كان موجوداً عند خط عرض المكسيك قبل 84 مليون سنة – لكنه وجد نفسه بعيداً عن المكسيك مع حلول نهاية الحقبة الوسطى.

وبين كل تأثيرات بازلت الفيضانات كان أكثرها تأثيراً في الحياة، كما رأينا في أكثر من مناسبة على صفحات هذا الكتاب، هو الانطلاق العظيم لثاني أكسيد الكربون وغازات الدفيئة الأخرى التي ترافق فيضانات البازلت البركانية. وازدادت حرارة الكرة الأرضية بسرعة في القطبين ومناطق أخرى من خطوط العرض المرتفعة، وأقلّ من ذلك عند خط الاستواء، فأدت هذه الظروف إلى ما نسمّيه الانقراض الدفيئة Greenhouse extinction. ويسبب القدرُ الضخم من فيضانات البازلت حدوثَ التسخن في خطوط العرض العالية، دافعاً بذلك المحيطات نحو الركود ومن ثم إلى عوز الأكسجين Anoxia. وارتفعت مياه المحيطات العميقة الممتلئة بكبريتيد الهيدروجين السامّ نحو السطح. ومن ثم ماتت الأحياء، كما حصل في الديفوني والبرمي وأواخر الترياسي. ومع ذلك، فإن السرّ الصغير الخبيث هو أننا نحن - الباحثين - في هذه الانقراضات الجماعية قد أخفينا هذه الأدلة غير المؤاتية تحت السجادة لمدة طويلة جداً. من ذا الذي يحتاج إلى البحث عن الموت بالركود ما دام لديه سبب يكفي ويزيد للانقراض نتيجة الاصطدام بكويكب؟

ويصل العلم إلى الحقيقة في النهاية، إذا ما كانت المسألة مثيرةً للاهتمام بشكل كافٍ. ولا يوجد إلا القليل من الأسئلة التي تثير اهتماماً أكثر من السؤال عن سبب انقراض الديناصورات (وكثير غيرها) قبل 65 مليون سنة. فلماذا لم تكن هناك تأثيرات جلية لمصاطب ديكان،[7] ما دامت جميع الفيضانات البازلتية الأخرى قد أدت إلى خراب شديد وسببت انقراضاً ملحوظاً جداً للأنواع؟

وفي الحقيقة، فقد سبّب الديكان كثيراً من الخراب. ربما الدليل الأفضل على ذلك، دع التواضع جانباً، يتأتى من عملنا في القارة القطبية الجنوبية. وفي عام 2012 بيّن أحد طلابنا توم توبين Tom Tobin بأنه حقاً حدث احترار في المحيطات قبل بضع مئات الآلاف من السنين السابقة للاصطدام – وأنّ الأنواع قد ماتت بسبب ذلك.[8] فكما ذكرنا، الاحترار العالمي (الذي هو في النهاية نتيجة لفيضانات البازلت) يكون أشدّ (من حيث

تغيُّر درجة الحرارة) في خطوط العرض العالية. والمناطق المدارية بالأصل دافئة بقدر ما يمكن أن تكون. وكما نرى في عالمنا المعاصر، فالقطبان الشمالي والجنوبي يتحملان وطأة التغير في درجة الحرارة - والدمار والانقراض الناجمين عن ذلك.

وكذلك كان الأمر في حدث الانقراض K-T. صحيح، فقد ضَرَبنا كويكبٌ ضخمٌ غير أنه قبل ذلك بمئات الآلاف من السنين، صار العالم أكثر حرارةً وأصيب بالركود نتيجة فيضانات البازلت. ويمكننا إنهاء هذا الفصل بتشبيه بالملاكمة. إنّ الضربة القاضية من دون شك لكمةٌ مفردةٌ. ومع ذلك، فمن النادر جداً أن تكون الضربة القاضية هي اللكمة الأولى، مهما كانت قوية. إنما اللكمات والضربات، خلال الجولات العديدة، هي التي تؤهب للضربة القاضية. فقد أضعفت مصاطبُ ديكان العالَم، والكويكبُ أنهى المهمة.

17

عصر الثدييات الثالث الذي تأخر كثيراً:
ما بين 65–50 مليون سنة مضت

أبكر الثدييات المعروفة كانت بالغة الصغر، حيواناتٌ مُهمَّشة بحجم الفأر سُمِّيت المورغانوكودونتيدات *Morganucodontids*، كانت تعيش (في خوفٍ دائم على الأغلب) بين العديد من الحيوانات المفترسة الأضخم منها الموجودة منذ 210 ملايين سنة في الترياسي المتأخر - واستطاعت بعده - بطريقة ما - النجاةَ من الانقراض الجماعي الترياسي الجوراسي T-J العظيم. وسريعاً انضمت إلى المورغانوكودونتيات ثدييات أخرى بدائية لكنها «حقيقية». فجميع الثدييات التي تعيش الآن، بمن فيها نحن، تنحدر من سلالة واحدة نجت من الانقراض. هذا ما وصل إليه العالم بعد أن بلغت حقبة الديناصورات الطويلة نهايتها منهارةً في النيران؛ وباء الجرذان، أو على الأقل وباء ناجين بحجم الجرذ.[1]

لقد اعتقد اختصاصيو علم الأحافير مطوّلاً أنّ أسلاف جميع الثدييات الحية اليوم نشأت على إحدى القارات الشمالية عندما انشطرت قارة بانغيا ببطء خلال الحقبة الوسطى، وليس أنها قبل ذلك بدأت بالهجرة البطيئة نحو الجنوب، على طول الطريق إلى القارة القطبية الجنوبية وأستراليا خلال وجود جسور من اليابسة (أو ممرات مائية لا تزال ضيقة) بين القارات. هذا وقد أطلق عليها نموذج شيروين-وليامز Sherwin-Williams للتطور، بالإشارة إلى شعار شركة صناعة الدهانات الأمريكية العريقة الذي يمثل الدهان وهو يسيل على الكرة الأرضية من شمالها إلى جنوبها. ولكن يجب رمي هذه الفكرة في الكومة العملاقة من الفرضيات التي فقدت مصداقيتها مع ظهور الأدلة الجديدة من الأحافير وعلم الوراثة. ويبدو الآن أنّ موجة تحديث الثدييات مضت من الجنوب إلى الشمال. وما يخبرنا بذلك بشكل خاص هو الأحافير التي جُمعت حديثاً لثدييات متقدمة أقدم بكثير من أي من الثدييات المعروفة في الشمال.

كما انضم علماء الوراثة، إذ قاموا مرة أخرى بتكرار طراز مألوف من الفهم الجديد المتأتي عن كلّ مقارنات الحمض النووي DNA إضافة إلى بيولوجيا النمو التطورية. فلا توجد نهاية للمفاجآت في القرن الحادي والعشرين.[2]

إليكم المفاجآت الثلاث الأكثر أهمية. أولاً، «المجموعات» الرئيسة للثدييات - الرتب Orders الحية الثماني عشرة، إضافة إلى بعض الرتيبات Suborders وحتى بعض العائلات التي

لا تزال موجودة اليوم - تنوعت في الحقيقة قبل انقراض الديناصورات بوقت طويل، ما يسقط الفكرة المسلّم بها لفترة طويلة بأنّ هذه المجموعات لم تتطور إلا بعد نكبة الانقراض K-T. وتشير الأحافير إلى أنّ معظم المجموعات المعاصرة ظهرت قبل نحو ستين مليون سنة، بعد زوال الديناصورات. والبيانات الجزيئية توحي أنها بدأت فعلياً بالتنوع قبل نحو مئة مليون سنة.

ثانياً، حدث معظم التطور الباكر للثدييات والتشعب التالي في القارات الجنوبية وليس الشمالية. ثالثاً، كثير من المجموعات التي أعتقد أنها أبناء عمّ أباعد هي في الحقيقة مجموعات شقيقة. فمثلاً، افترض علماء الأحافير على الدوام أنّ الخفافيش كانت في ذات الرتبة العليا الخاصة ذبابة الأشجار Tree shrew والليمور الطائر Flying lemurs والرئيسيات Primates. غير أنّ البيانات الوراثية تصنف الخفافيش مع الخنازير والبقر والخيل والحيتان. فمن المعروف الآن أنّ الحيتان بحد ذاتها أتت من أسلاف شبيهة بالخنزير لا من السلالة نفسها التي نشأت منها الفقمات Seals.

ويعود جزء كبير من نجاح الثدييات إلى التغيرات التشريحية، بما في ذلك انفصال الفك عن عظام الأذن؛ ما سمح بتمدد جمجمة الثدييات لاحقاً إلى الجانبين والخلف، وهو شرط أساسي لأدمغة أضخم. ولكن الأكثر أهمية من بين جميع الإبداعات كانت الثورة في أسنان الثدييات، فقد تشابكت الطواحن العلوية والسفلية في عظام الفكين لدى المورغانوكودونتيات؛ ما سمح لها بتقطيع طعامها إلى قطع.

تنشطر ثدييات اليوم إلى مجموعتين رئيستين: الجرابيات السلفية Ancestral marsupials التي تنتج مواليد صغيرة جداً ثم تحتفظ بها في الجراب، وخلفها الأكثر تنوعاً ووفرةً؛ والثدييات المشيمية Placental mammals. وتشير دراسات الحمض النووي DNA الحديثة إلى أنّ الثدييات المشيمية بدأت بالتشعب Diverge عن الجرابيات باكراً منذ 175 مليون سنة،[4] وانضمت إليها شهادات الأحافير، ولا سيما من الصين.[5] فهناك تدعم أُحفورة جديدة كاملة لنوع المشيمة البدئية والتي عُثر عليها في مقاطعة لايونينغ Liaoning ما الاستدلال عليه بالحمض النووي DNA وهو أن المشيميات بدأت بالتطور في وقت أبكر مما كان يُعتقد سابقاً. إنّ عمر هذه الأُحفورة - التي سُميت إيومايا Eomaia البالغ 125 مليون سنة - يجعل الأمر أيسر على علماء الأحافير لقبول الدليل الوراثي القائل إن المشيميات البدئية الأولى بدأت بالتطور أبكر بما يصل إلى 50 مليون سنة، أي في الجوراسي.[6]

وتتضمن المجموعة الأقدم من الثدييات المشيمية الحية الفيلة وآكلات النمل وخروف البحر Manatees والوبر Hyraxes (أرانب الصخور).[7] وعندما انفصلت إفريقيا عما كانت قارة

بانغيا العملاقة، حملت هذه الحيوانات معها لتتطور في عزلة لعشرات الملايين من السنين. كما فصل تبعثر القارات أمريكا الجنوبية عن أوراسيا Eurasia وأمريكا الشمالية لملايين السنين؛ فصارت أمريكا الجنوبية موطناً للكسلانيات Sloth والمدرعات Armadillos وآكلات النمل. وتعيش في القارات الشمالية الثدييات المشيمية الأحدث سناً الموجودة على الكرة الأرضية، بما فيها الفقمات والبقر والخيل والحيتان والقنافذ والقوارض وزبابة الأشجار والقردة وبالنهاية البشر.

وإذا سبق الجزء الأكبر من تنوُّع الثدييات حدث الانقراض الجماعي K-T، فإنّ التغير الأوضح - وهو زيادة الحجم - حدث بعد فترة قصيرة من الكارثة. فخلال 270 ألف سنة كانت الثدييات تتنوع وحجمها يتزايد، إلا أنّ الثدييات الضخمة حقاً لم تظهر إلا قبل نحو 55 مليون سنة. وحينذاك تزامن الارتفاع السريع في درجات حرارة العالم مع نمو واسع الانتشار للغابات حول العالم، حتى قرب القطبين، وربما ساعد هذا الجانب من تاريخ النباتات على تحفيز الزيادة العظيمة في تنوع الثدييات.

الحياة البرية في الباليوسين

إن وجود الباليوسين يعود أساساً إلى الانقراض الجماعي الطباشيري الثالثي K-T. وكان ذلك الانقراض لا لبس فيه بالمطلق من حيث سببه وتأثيره. وصار العالم بعده مختلفاً جداً جداً عما سبق على مستويات كثيرة جداً.

وعلى اليابسة، فقد سادت الديناصورات لفترة طويلة جداً لدرجة أنه مع زوالها كان لابدّ من بناء سريع نسبياً لمجموعة متكاملة من العلاقات الإيكولوجية بين الناجين. ومع الغياب المفاجئ لكثير جداً من حيوانات اليابسة، فقد انصب صنبور التطور لتشكل الأنواع الجديدة على واحد من أعظم ينابيع التنوُّع التي شهدها العالم يوماً. وكانت الثدييات هي الفائز الأكبر بوضوح على اليابسة، غير أنّ الطيور قامت بعودة كذلك، وتنافست لبعض الوقت مع ثدييات اليابسة على الموارد المختلفة.

إذن، ضربت الصخرةُ من الفضاء نظامَ المحيطات. وترددت أصداء التأثيرات المناخية العظيمة بين النظم البيئية لآلاف السنين، وهناك عدم استقرار مناخي عظيم فضلاً على تبريد طفيف كان قد أصاب العالم بالأصل على اليابسة وفي البحر معاً. وكانت التغيرات في الكائنات الحية عظيمة أيضاً. فمثلاً، أدى زوال الديناصورات إلى زيادة كثافة الغابات. ومثلما تؤدي الفيلة المعاصرة دوراً مهماً في إدامة فسحات مكشوفة في الغابات بوسطة تحركها وعادات تغذيها المُخرِّبة، كذلك كانت الديناصورات التي كانت أحجامها أكبر بكثير قد أثرت حقيقة

في أنماط الحياة النباتية. ومع زوالها المفاجئ زادت كثافة الغابات، وكأن بستانياً نشيطاً ترك عمله فتحولت حديقة الأشجار المُقلَّمة إلى أدغال.

ومع حلول الباليوسين المتأخر، بعد أكثر من سبعة ملايين سنة من حدث الانقراض K-T، استقر المناخ العالمي. ودفئت الكرة الأرضية ببطء لتنتج درجات حرارة دافئة عالمياً. ومن أدلة نظائر الأكسجين نعلم أنّ المياه السطحية الاستوائية للمحيطات كانت أدفأ من 20 درجة سيليزية، وتصل إلى 26 درجة سيليزية في بعض المناطق، وبذلك كانت مشابهة إلى حدّ بعيد لدرجات حرارة المحيطات في خطوط العرض المشابهة اليوم. غير أنّ الاختلاف الكبير عن عالمنا حدث في خطوط العرض الأكثر ارتفاعاً. ففي المنطقتين القطبيتين الشمالية والجنوبية كان سطح البحر بين 10 و12 درجة سيليزية، مقارنة بدرجات الحرارة القريبة من التجمد في زمننا. وهكذا، كان اختلاف درجات الحرارة بين خط الاستواء والقطبين نحو 10 إلى 15 درجة سيليزية، أي نحو نصف ما نحن عليه اليوم. مع ذلك، وعلى الرغم من هذه الاختلافات في درجة الحرارة، كانت أنماط الدوران المحيطي مشابهة نوعاً ما لطرز اليوم. وما هو أكثر أهمية، أنّ كتل الماء المؤكسَج التي سينتهي بها المطاف في النهاية على قاع المحيط تكونت في مواقع خطوط العرض المرتفعة، تماماً كما تفعل حالياً.

وبعد حدث الانقراض الجماعي K-T الذي حدث قبل 65 مليون سنة، استغرق نمو الثدييات الناجية بضعة ملايين من السنين لتصبح كبيرة بشكل يجعلها تؤثر في أنماط النبات. وهناك كثير من الصور الفنية لثدييات بالغة الصغر بحجم الجرذان تزحف من أوكار شبيهة بملاجئ القنابل في عالم من جثث الديناصورات النتنة المتفسِّخة. ولبضعة أشهر، لابدّ من أنّ هذه الثدييات التي تستطيع أكل الجيَف كانت تشعر بأنها تعيش في الجنة. ولكن بعد وقت يسير لم يبق هناك إلا العظام، وحتى هذه تفسخت أو دُفنت على نحو سريع ما أجبر جميع الثدييات على المضي في سلسلة جديدة التنظيم من شبكات غذائية غير مسبوقة. وكان ذلك قبل زمن الأعشاب، لذلك كانت العواشب في زمن الباليوسين الباكر آكلات أوراق أو ثمار، لا عواشب بالمعنى الدقيق. وعلى ما يبدو، لم يكن هناك سوى القليل من آكلات الأوراق. فمعظم أسنان ثدييات الباليوسين تشير إلى حمية من الحشرات أو الثمار أو البراعم الغضة وليس الأوراق النباتية الأكثر قساوة، ومن الممكن أنّ غيرها كان من آكلات الجذور والدرنات. ولم تظهر مورفولوجيا الأسنان المناسبة لأكل الأوراق النباتية بأعداد تستحق الذكر إلا في النصف الثاني من الحقبة. ولكن، ما إنْ فُتح صنبور التطور، حتى لفظ أنواعاً جديدة من الثدييات، ثدييات جديدة أضخم فأضخم في سيل من التطور. وبعد ذلك، فقط بعد تسعة ملايين سنة من حدث الانقراض الجماعي العظيم K-T، تأثر العالم الحيوي مجدداً بأزمة بيئية.

الحدث الحراري الباليوسيني الإيوسيني (PETM)

عانت الكرة الأرضية بحلول الحقبة الحديثة الباكرة ما لا يقل عن تسعة انقراضات جماعية نعلم بها: كان أولها هو حدث الأكسجة العظيم والكرة الثلجية التي أطلقها، وكان الثاني بعد أكثر من بليون سنة خلال الكريوجيني وبعد ذلك وبالترتيب، الانقراضات الجماعية في الإدياكاري المتأخر والكامبري المتأخر والأوردفيشي المتأخر والديفوني المتأخر والبرمي المتأخر والترياسي المتأخر والطباشيري المتأخر. وكانت أسبابها مختلفة إلى أبعد الحدود: من ظهور الأكسجين فجأة إلى عوز الأكسجين، ومن ظهور الحيوانات المفترسة إلى بدء عوز الأكسجين المقترن بانبعاثات كبريتيد الهيدروجين إلى اصطدام الكويكب. ولكن عند نهاية فترة الباليوسين، بعد تسعة ملايين سنة فقط من نفوق الديناصورات، ظهر قاتل جديد هو الميثان، الذي أطلق واحداً من أسرع الارتفاعات المعروفة في درجات حرارة العالم. وتُسمّى هذه الحادثة الحدث الحراري الباليوسيني الإيوسيني *Paleocene-Eocene Thermal Event*، واختصارا: **الحدث الحراري (PETM)**.

وكان علماء المحيطات أول من اكتشف هذا الحدث،[8] ولم يكونوا يبحثون على الإطلاق عن أي نوع من الأحداث الحرارية في أواخر عصر الباليوسين، بل كانوا يحاولون الحصول على معطيات جديدة عن حدث الانقراض الجماعي K-T من العينات الأسطوانية المستخرَجة بواسطة تنقيب أعماق البحار من خلال برنامج حفر المحيطات Ocean Drilling Program (اختصارا: البرنامج ODP) في الولايات المتحدة. ولكي تحفر لتصل إلى الطباشيري، فكان لابدّ لآلات الحفر من أنْ تمرّ أولاً عبر رواسب الإيوسين ثم الباليوسين. وأُخِذت العينات الأسطوانية من تلك الأعماق فيما تغلغلت آلات الحفر إلى أعماق أكبر نحو محاجرها الحقيقية.

وعندما أجريت الاختبارات على هذه العينات الأسطوانية الأحدث وقيست نظائر الكربون والأكسجين اللذين وُجدا في قواقع الأوليات Protists وحيدة الخلية بالغة الصغر والمسماة الفورامينيفرا القاعية Benthic Foraminifera، فإن درجات الحرارة المسجّلة، وكذلك نسب الكربون 12 إلى الكربون 13، بدا أنهما لابدّ أن يكونا خطأين: إذ إنهما بيّنا بأنه عند مقارنة سلسلة من العينات الأسطوانية، فإنّ تلك المسحوبة مع طبقات من أجزاء المياه القديمة الأكثر عمقاً في المحيط أبدت درجات حرارة غابرة أكثر دفئاً من تلك الموجودة في مواقع غابرة أكثر ضحالة. وحتى في القطب الجنوبي البارد اليوم، يبرد الماء مع العمق، وقديماً في الباليوسين الذي كان بلا شك أكثر دفئاً، لابدّ للمياه العميقة من أن تكون أبرد بوضوح من المياه الأكثر ضحالة. غير أنّ الأرقام هنا قالت بعكس ذلك تماماً: المياه العميقة دافئة والمياه الأكثر ضحالة باردة. فقد ازداد دفء المحيط العميق بشكل شاذ خلال فترة من الزمن قصيرة نسبياً.

قرب الحد الباليوسيني الإيوسيني يوجد ارتفاع مفاجئ في الرماد البركاني العالمي،[9] ومثل الغبار، تجد هذه المادة الناعمة طريقها إلى قاع البحر قادمة من الغلاف الجوي. لكنها تتموضع هناك نتيجة الثوران البركاني، وليست أعاصير الغلاف الجوي. ولا يمكن لهذا الارتفاع إلا أن يكون ناجماً عن ارتفاع مفاجئ في النشاط البركاني العالمي، قبل نحو 58 إلى 56 مليون سنة مضت. وقد أثبتت الأبحاث اللاحقة في كثير من الأماكن حول الكرة الأرضية أن هذه النتائج ظاهرة عالمية وليست حدثاً شاذاً محدوداً بحوض محيط واحد.

بقيت المناطق المدارية في الباليوسين على درجات الحرارة (حارة) نفسها، لكن المنطقتين القطبيتين الشمالية والجنوبية ازدادتا دفئاً بشكل ملحوظ. ففي الباليوسين كان الاختلاف في درجة حرارة ماء البحر بين خط الاستواء والقطبين ضخماً، إذ وصل إلى 17 درجة سيليزية (وهو الآن أكثر ضخامة، 22 درجة سيليزية). ولكن بحلول بداية الإيوسين تقلص الفارق إلى ست درجات سيليزية فقط. ومع ازدياد دفء خطوط العرض المرتفعة، تباطأ التبادل الحراري بين المنطقتين مقللاً بذلك عدد الأعاصير وضراوتها. وصار العالم هادئاً وحاراً جداً، كما حصل في العديد من المرات سابقاً. وكان هذا انقراضاً جماعياً آخر بالدفيئة.

كما تكشفت سجلات نظائر الكربون عبر الحد الباليوسيني-الإيوسيني في اثنتين من العينات الأسطوانية عن مفاجأة. إنهما بيّنتا انحرافاً سلبياً قصير الأمد - نمط السجل الذي يظهر عندما تنخفض كمية الحياة النباتية - سمة مميزة لانقراض جماعي. فبدأ علماء الأحافير الآخرون بالأبحاث في سجل البقاء الخاص بساكني القيعان في المنطقة، وبحثوا على وجه الخصوص في الفورامينيفرا القاعية الشائعة، فوجدوا دليلاً على انقراض جماعي كارثي في القيعان. فهل كان الاحترار المفاجئ في الأعماق هو ما محا الأنواع المتكيفة مع البرودة من الوجود على نحو سريع؟ نُشرت هذه النتائج في بداية تسعينات القرن العشرين، وقريباً بعد قيام عالم الأحافير الياباني كونيو كايهو Kunio Kaiho بنشر أبحاث استدل فيها على أنّ نفوق كائنات قاع البحر لم يتقرر بارتفاع درجة الحرارة في الأعماق السحيقة من البحر، بل نجم عن انخفاض مستويات الأكسجين في القيعان. وبدا ذلك متوافقاً مع الحدس والمنطق؛ لأنّ الماء الدافئ قد يكون متخماً بالتغذية وفقيرا بالأكسجين.

فماذا كان السبب النهائي لاحترار القاع العميق وانخفاض الأكسجين فيه، فضلاً عن احترار المياه السطحية؟ فقد سَبّب حدث اصطدام كويكب الطباشيري الثالثي دماراً في المياه الضحلة وكان كافياً لأن يقتل تقريباً جميع العوالق في عمود الماء السطحي والعلوي، لكنه ترك عمود الماء العميق سالماً نسبياً عدا ما يتعلق بفقد المغذيات الآتية من الأعلى. وقد نتصور أن احترار

الجزء الأكثر عمقاً من المحيط حدث بسبب الاحترار السريع بمساحات واسعة من قاع المحيط. لكن هذا سيتطلب نوعاً جديداً بكامله من النشاط البركاني في أعماق المحيطات. وتوجد في قاع البحر فعلاً مناطق ذات تدفق حراري مرتفع، غير أنها محدودة بالسلاسل الجبلية الضيقة نسبياً في وسط المحيط حيث يحدث امتداد أرض البحر - طور نمو قاع المحيط نتيجة حركة الصفائح التكتونية. حتى في حال حركة الصفائح بسرعة أعلى بكثير نتيجة زيادة شدة النشاط البركاني على طول أنظمة الصدوع الموجودة في منتصف المحيطات، فإنها لا تستطيع أن تؤدي إلى مثل ذلك التسخين. وقد صيغت فرضية تبيّن لاحقاً أنها صحيحة: بأنّ القاع الدافئ الكامل قد نجم عن المياه المدارية الدافئة، حيث يعمل التبخر على جعل المياه السطحية أكثر ملوحة وكثافة، ومن ثم ينتقل هذا الماء المالح والدافئ على طول قاع البحر، وصولاً إلى مواقع خطوط العرض المرتفعة الباردة في عصر الباليوسين.

وأحد جوانب التيارات المائية المحيطية والتصدير الطبيعي لماء السطح البارد والمؤكسج إلى الأسفل إلى قيعان البحار العميقة، لم يكن يعمل في محيطات الباليوسين، بل كان نظام الدورة الحرارية الملحية العميق - الطريقة الرئيسة التي تُخلط بها مياه المحيطات - معاكساً تماماً لكيفية عمل هذه التيارات في محيطاتنا الحالية. وكانت الضحايا الأولى لهذا الوضع هي الأحياء الدقيقة التي تحتاج إلى الأكسجين، الفورامينيفرا القاعية في البحار العميقة. انقرض كثير من هذه الأنواع، ووقع ذلك بسرعة عالية نسبياً في حدث استمر نحو أربعمئة ألف سنة. ولكن إذا أردنا أن نعتبره انقراضاً جماعياً، فعلينا أن نبيّن أن تأثيره لم يقتصر على المحيطات، بل تأثر به حيوانات اليابسة أيضاً.

وكما وقعت تغيرات شاملة في الكائنات الحية في المحيطات بسبب حدث محيطات الدفيئة على اليابسة أيضاً.[10] فقد حرض الانقراض المكتَشَف حديثاً في البحار العميقة علماء الأحافير على البحث من جديد (وعلى جمع العينات من جديد أيضاً) في السجل الأحفوري الخاص بحيوانات اليابسة في الباليوسين، ليعرفوا ما إذا كان هناك انقراض على اليابسة في نهاية فترة الباليوسين. فوجدوا بعد قليل أنّ تقلباً عظيماً قد حدث لدى الثدييات. وقد بيّن التأريخ الدقيق سريعاً أنّ الانقراضات على اليابسة وفي البحر حدثت بشكل متزامن.

وبالنسبة إلى السجل الأحفوري على اليابسة، فقد بدا أنّ هذا الحدث ليس سوى بداية حيوانات الثدييات في يومنا هذا. وبينما كانت هناك أنواع هائلة العدد من الثدييات مع حلول الجزء الأخير من الباليوسين (أمكن وصف ثلاثين عائلة متميزة من الأحافير المجموعة حتى الآن)، كان كثير منها صغيراً وبعضها ينتمي إلى مجموعات لم تعُد موجودة الآن، بما في

ذلك الناجي منها من الأشكال الصغيرة والشبيهة بالقوارض وكثير من أشكال الجرابيات وبعض الحافريات الشبيهة بالراكون (تناقض غريب، إذ اتخذت الحافريات الجديدة العاشبة بالكامل دور آكلات اللحوم في الباليوسين). كما كانت هناك آكلات حشرات حقيقية والرئيسيات الأولى (وكانت، مثل آكلات الحشرات، لا تزال صغيرة الحجم). ومع حلول زمن الباليوسين المتأخر كانت هناك أيضاً أشكال أضخم وكان بعضها غريباً حقاً.

كانت أشكال بحجم يتراوح بين حجم الكلب إلى حجم البيسون، والتي تُدعى البانتودونتيات *Pantodonts*، من آكلات الأوراق التي تفرعت إلى العيش في نمط حياة نصف مائية مثل فرس النهر، أو العيش على الأشجار، إضافة إلى وجود أشكال أضخم تتحرك على قوائمها الأربع كاملة على أرض الغابة. وعلى العموم كانت بدينة الجسم مع سيقان قصيرة، ولا يستطيع المرء إلا أن يتكهن بأنها كانت خرقاء جداً ومشيتها غير رشيقة، على الأقل مقارنة بالعواشب المعاصرة. مع ذلك، وبقدر ما كانت ضخمة، انضمت إليها مع حلول نهاية الباليوسين عواشب أضخم منها، الدينوسيراتا Dinocerata العملاقة (بمعنى فظيعات القرون)، التي كانت تشبه وحيد القرن الضخم مع المجموعات الغريبة من الحدبات والقرون على جماجمها.

وفي أكوام الطبقات التي تشير إلى الانتقال من الباليوسين إلى الإيوسين، يظهر انخفاض في الأنواع، ومع مرور الوقت - ليس بشكل فوري - تظهر أشكال جديدة من العظام. ويأتي كثير منها من أنواع أكثر ألفة لدينا. وظهرت الحافريات الأولى من مزدوجات الأصابع ذوات الظلف Even-toed ungulates ومفردات الأصابع Odd-toed، وقريباً تطورت لواحم أكثر معاصرة ذات علاقة بالمجموعات الحالية لتأكل العواشب الجديدة، وكان على الجميع أن يأخذوا بالحسبان حدثاً غيّر المناخ بعينه في العالم. والدرس من الانقراضات الجماعية السابقة هو أنّ الظهور الحديث لم يكن ليتطور على الشكل الذي تطور عليه ما لم يفتح انقراضٌ ملموس البابَ أمام إمكانية ظهور المورفولوجيات الجديدة. وحدث هذا أيضاً في نهاية الباليوسين.

وقد أعطتنا زميلتنا فرانشيسكا ماكإنيرني Francesca McInerney ملخصاً رائعاً مستنداً إلى عملها في شمال الغرب الأمريكي، وهو يمكن أن يساعدنا على وصف الحدث الحراري الباليوسيني الإيوسيني *PETM*. أولاً، لاحظت أنّ هذا الحدث ذو صلة وثيقة بنا نحن - البشر - فكمية الكربون التي انطلقت إلى الغلاف الجوي، نحو 12000 إلى 15000 بليون طن، مكافئة تقريباً لما نطلقه نحن البشر عبر الزمن بواسطة صناعاتنا واستخدامنا للطاقة. فالتغير في درجة الحرارة الناجم عن زيادة غازات الدفيئة في أثناء الحدث الحراري PETM جعل العالَم أكثر حرارة

بنحو 5 إلى 9 درجات سيليزية مما هو عليه الآن. فقد استمر الحدث الفعلي نحو 10000 سنة. وكانت النباتات قبل الحدث وبعده مختلفة عن تلك الموجودة في أثناء الحدث، عندما اختفت كل عاريات البذور Gymnosperms من الصنوبريات Pines وأمثالها. والنباتات التي كانت موجودة في مجال عملها، وفق اكتشافات عالم النباتات القديمة سكوت وينغ Scott Wing من معهد سميثسونيان Smithsonian، كانت في الغالب نباتات عاشت حتى الحدث الحراري PETM في خطوط العرض الأكثر انخفاضاً، ومن ثمَّ في درجات حرارة أكثر ارتفاعاً. وبعد الحدث عادت النباتات القديمة وكذلك الحشرات التي كانت موجودة قبل الـ 10000 سنة من الجحيم الحقيقي على الأرض، أما الثدييات؛ فلا. وأدى هذا الحدث إلى تغير بالجملة في ثدييات أمريكا الشمالية.

وملاحظة أخيرة. إذا كانت هناك صفائح جليد ضخمة مثل الموجودة لدينا اليوم، فإنها كانت ستذوب سريعاً. وهذا يسبب ارتفاع مستوى سطح البحر. فمن وجهة نظرنا، هذا هو الجانب الأكثر خطورة للدفيئة الناجمة عن نشاط البشر: نحن نقوم بإذابة جليد القطب الجنوبي وغرينلاند والذي سيغمر خلال القرون المقبلة مناطق شاسعة من الأراضي الزراعية البشرية الحالية. إنّ أعلى سرعة ارتفاع معروفة في مستوى سطح البحر موجودة حالياً على الساحل الصيني الجنوبي، وهو واحدة من المناطق ذات الكثافة السكانية الأعلى على الكرة الأرضية مع مزارع الأرز الواقعة على مستوى سطح البحر.

الأراضي العشبية وثدييات العالم البارد في الحقبة الحديثة

من الإيوسين إلى بدء فترة الميوسين منذ 23.5-5.3 مليون سنة مضت، بدأ العالم يبرد ببطء. ففي البداية، وخلال الإيوسين، لم يكن هذا قابلاً للإدراك تقريباً، وفي الحقيقة كانت هناك غابة مدارية عالمية مع تماسيح تحيا داخل الدائرة القطبية الشمالية في اليوم الحاضر. ولكن في الأوليغوسين Oligocene تسارع هذا التبريد مكوناً نمطاً مختلفاً من المناخ السائد؛ فتغير ما كان مناخاً عالمياً موحداً تقريباً إلى مناخ ذي فصول شديدة التباين. وفي الوقت ذاته بدأت صفائح عملاقة من الجليد القاري بالتكون في القارة القطبية الجنوبية ومن المحتمل في غرينلاند أيضاً. وأدت هذه الصفائح المتضخمة من الجليد إلى هبوط كبير وسريع في مستوى سطح البحر. وفي خطوط العرض العليا، تراجعت الغابات تدريجياً في كثير من الأماكن أمام المروج العشبية والسافانا. ولكن هناك تغيرات أخرى كانت تحدث أيضاً، تغيرات في الغلاف الجوي سيثبت أنّ لها عواقب هائلة في تاريخ الحياة.

تحتاج النباتات إلى ثاني أكسيد الكربون. إلا أن تاريخ ثاني أكسيد الكربون خلال بلايين السنين على الكرة الأرضية كان تاريخاً من الارتفاعات والانخفاضات قصيرة الأمد، وما كان في الواقع مجرد اختلافات صغرى في نزعة ذات أمد أطول بكثير هو الانخفاض في تراكيز هذا الغاز على المدى الطويل. مع هذا الهبوط الطويل، تبردت كرتنا الأرضية تدريجياً، خاصة خلال الأربعين مليون سنة الأخيرة. ولكن أعظم ما أثر على تطور النباتات في الحقبة الحديثة لم يكن هو التغير في درجة الحرارة، بل ربما كان أهم منه التكوين التطوري لشكل أكثر فعالية للبناء الضوئي، يُدعى البناء الضوئي C_4، الذي حلّ في كثير من النباتات محل آلية أقدم تُدعى C_3 (يشير الرقم 3 أو 4 في هذين المصطلحين إلى التغيرات الكيميائية المختلفة الحادثة عندما يمتزج ضوء الشمس مع ثاني أكسيد الكربون لتكوين خلايا وأنسجة النبات الحي). وفي الحقيقة، تميز البناء الضوئي C_4 بالازدياد السريع في أهميته من حيث عدد النباتات التي تستخدم هذه الآلية بدل الآلية القديمة.

النباتات التي تستخدم المسار C_3 تخلّف توقيع نظائر كربون مختلفاً عن توقيع النباتات التي تستخدم المسار C_4. ولا تخلف النباتات وحدها هذه الشارة التي يمكن قياسها عندما يتمّ تحليل أي نسيج من النبات باستخدام مقياس الطيف الكتلي المتخصص في فحص الأنسجة الحية، بل كذلك أي حيوان يأكل هذه النباتات سيخلّف أثراً لها أيضاً. لذلك يمكننا من السجل الأحفوري أن نعرف ما إذا كان نوع معين من العواشب قد تغذى بنباتات C_3 أو C_4 (أو حتى خليط منهما).

لدينا خطان من الأدلة التي تظهر وقت نشأة نباتات المسار C_4 أولاً. الخط الأول هو الساعة الجزيئية. فقد استنتج علماء الوراثة من مقارنة جينومات نباتات C_4 بـC_3 أنّ الاختلافات كانت كبيرة لدرجة تستبعد أن تكون آلية C_4 قد نشأت قبل أقل من 25 مليون سنة (وكذلك أكثر من 32 مليون سنة). إلا أن السجل الأحفوري يعطي جواباً مختلفاً تماماً عن السؤال حول موعد ظهور طريقة البناء الضوئي لنباتات C_4 أول مرة، إذ إنّ الأحافير الأولى لنباتات C_4 لا يزيد عمرها على 12 إلى 13 مليون سنة مضت.

ولم يكن التطور نحو مسار نباتات C_4 اختراقاً تطورياً مفاجئاً تمّ توريثه إلى الأعداد المتزايدة من أنواع النباتات. وفي الحقيقة، يحتمل أنه تطور بشكل منفصل لأكثر من أربعين مرة في الماضي، مؤدياً بذلك إلى سلالات منفصلة كثيرة من النباتات. إنّ نباتات C4 النهائية هي نباتات مقاومة للحريق والجفاف ومتكيفة مع الحرارة والمناخات الجافة.

ونباتات C_4 الأكثر أهمية هي الأعشاب بسبب هيمنة النظام الغذائي العشبي لدى كثير جداً من العواشب والثدييات العاشبة الضخمة، إضافة إلى كثير من أنواع الطيور بما فيها الإوز

واسع الانتشار الذي يصادف الآن في معظم المروج الخضراء الحضرية قرب المسطحات المائية. وانخفاض ثاني أكسيد الكربون، خاصة خلال العشرين مليون سنة الأخيرة، حرّض بقوة توسع الأراضي العشبية المؤلفة من نباتات C_4؛[11] فمعظم الأعشاب لا تستطيع العيش على أرض الغابات، حيث لا تناسب الظروف الأبرد والأكثر ظلاً نموها.

ومع ذلك، يخلق زوال الغابات موئلاً أكثر انفتاحاً، وهو أفضل بكثير للأعشاب. وبينما كانت الفكرة السائدة لفترة طويلة هي أنّ الانخفاض طويل الأمد في ثاني أكسيد الكربون أطلق التطور نحو سيطرة أعشاب C_4، فإنه توجد فكرة بديلة وأحدث مفادها أنّ التغير في غطاء الغابات على الكوكب كان مهماً بقدر أهمية انخفاض مستويات ثاني أكسيد الكربون أو ربما أكثر أهمية منه. ولكن ما الذي سبّب الانخفاض الجذري في مساحات الغابات؟ يبدو أنّ الجواب هو حرائق الغابات.

إنّ الجانب الذي بخس تقديره إلى حدّ بعيد لكوكب فيه نباتات هو تأثير حرائق الغابات. يتأثر الحريق بالطبع بمستويات الأكسجين. ففي أزمنة الأكسجين الأكثر ارتفاعاً، خاصة في أثناء العصر الكربوني قبل نحو 320 إلى 300 مليون سنة مضت، يحتمل أن حرائق الغابات كانت مستمرة. ولابدّ أنّ منظراً من الفضاء في أثناء هذه الفترة الزمنية أظهرَ غلافاً جوياً ملوثاً بالدخان السميك، لذلك لابدّ من أنه كان هناك غلالة شاملة تُغطي العالَم جعل وجود الأيام مشمسة الصحوة أمراً نادراً. ومثل هذا الدخان الذي كان يغطي جزءاً كبيراً من القارات لابدّ من أن يكون له تأثير ملموس في درجات حرارة العالم؛ لأنّ كثيراً من الدخان الناجم عن حرائق الغابات يبدو فاتح اللون عندما يُرى من الأعلى. ولابدّ من أن تكون الغلالة والدخان العالميان قد عكسا مزيداً من ضوء الشمس نحو الفضاء مما لو كان الجو صحواً، وبذلك غيّرا الألبيدو Albedo (درجة انعكاس أشعة الشمس التي تسطع على الكرة الأرضية).

ولابدّ من أن هذا كله أطلق سلسلة من الأحداث التي غيرت جذرياً ليس المناخ العالمي فحسب، بل وتاريخ الحياة كله منذ ذلك الوقت وقُدُماً. وارتفاع تركيز الأكسجين وذروته المديدة في مستوى تجاوز ثلاثين في المئة طوال العصر الكربوني لابدّ من أنه سبّب المزيد من حرائق الغابات. وكما ذكرنا سابقا، فقد سبّب هذا انخفاضاً عالمياً في درجات الحرارة، ما أطلق سلسلة من الأحداث تمخضت عن واحد من أطول العصور الجليدية في القطبين في تاريخ الكرة الأرضية بكامله. وعلى الرغم من أنها لم تكن عالمية في امتدادها مثل كرات الثلج، فإنها كانت تقريباً مديدة بقدر ما كان بعض منها. فربما دام زمن الجليد ذاك لما يزيد على 50 مليون سنة، وهي فترة زمنية تزامنت مع بعض الأحداث الأكثر أهمية في تاريخ الأرض، بما في ذلك استعمار الحيوانات لليابسة وتطور نباتات اليابسة الجديدة المتقدمة (بالنسبة إلى ذلك الزمن) والتي

كانت قادرة على استعمار مناطق المرتفعات في القارات التي لم تكن سابقاً مسكونة بالنباتات، والظهور الأول لبعض من مجموعات الفقاريات الأكثر أهمية - بما في ذلك الزواحف الباكرة وبعد ذلك بقليل أسلاف الثدييات. ولكن يوجد جانب آخر للحريق الذي لابدّ من أنه أثر في تاريخ الحياة النباتية، ومن ثمّ تاريخ الحياة بشكل عام.

لقد أظهرت الدراسات الحديثة المُجراة على حرائق الغابات في حوض الأمازون أن الحرائق الهائلة يمكن أن تؤثر بشكل كبير في المناخ، وليس مناخ المناطق المدارية فحسب. فقد لاحظ ديفيد بيرلينغ David Beerling في كتابه الكوكب الزمردي *The Emerald Planet* أنه في أثناء أبريل من عام 1988، يحتمل أن الدخان الناجم عن الحرائق قد ثبط تكوّن الغيوم فوق أجزاء من أمريكا الشمالية؛ مما أثر بدوره في نماذج هطول المطر. وفي الحقيقة كانت هذه الفترة الزمنية فترة الجفاف الشديد، وتسببت بواحد من الأشهر الأكثر جفافاً في القرن العشرين. وهذا الجفاف الربيعي تبع بعضاً من الحرائق الهائلة الأكثر شدة على الإطلاق، منها اثنان حدثا في أمريكا الشمالية في يوليو من عام 1988، عامٌ احترقت فيه بشدة مناطق ضخمة حول منتزه يلوستون الوطني Yellowstone National Park. ويأتي بيرلينغ بطريقة جديدة لفهم انتشار الأراضي العشبية C_4، يحتمل أنه قد حدث تفعيل نظام تغذية راجعة إيجابي Positive feedback[12].

إنّ التغذيات الراجعة الإيجابية هي تلك التي تزيد التغيرات البيئية في اتجاه واحد محدد. وفي عالمنا اليوم، بسبب الغلاف الجوي الآخذ بالتسخن تزايد ذوبان جليد المنطقة القطبية الشمالية، وبذلك تبقى نسبة سيليزية أصغر فأصغر من الجليد الأبيض العاكس بشكل مرتفع في نصف الكرة الشمالي. فالمحيطات البيضاء المُغطاة بالجليد تعكس ضوء الشمس إلى الفضاء، لكن عندما يذوب الجليد ويحلّ محله ماء مفتوح قاتم اللون، تمتص المحيطات حرارة أكثر بكثير فتسخن البحار. وعندما تسخن البحار يذوب المزيد من الجليد وتستمر الدورة. فالارتجاع الإيجابي هو أنّ ازدياد الحرارة يسبب المزيد من الحرارة.

وطرح ديفيد بيرلينغ رأياً مفاده أنه يوجد ارتجاع إيجابي في حرائق الغابات مسبباً مزيداً من حرائق الغابات، وهذه الحرائق تغير المناخ، مؤدية إلى مزيد من الجفاف ما يجعل مناطق متزايدة عرضة للاحتراق، ومسببة امتداداً أكبر لخراب الحرائق. وهكذا تسير الدورة: الاحتراق يسبب المزيد من الاحتراق.

نحن ندخل زمناً ترتفع فيه درجات حرارة العالم بسرعة. فالآثار النهائية لهذا الارتفاع على الكرة الأرضية ليست مجهولة تماماً. والآثار التي يصعب التنبؤ بها هي تأثير عالم جديد ساخن ذي مستوى سطح بحرٍ مرتفعٍ في الصناعات والسكان والحضارات البشرية.

18

عصر الطيور: ما بين 50 حتى 2.5 مليون سنة مضت

غالباً ما يُدرَّس تاريخ الحياة للأطفال مُقسّماً كما يلي: ظهرت الأسماك فيما يُسمّى عصر الأسماك، ثم زحف بعضها على الشاطئ ليبدأ عصر البرمائيات التي بدأت بدورها ما كان يُسمّى عصر الزواحف، أو أحياناً عصر الديناصورات، وانتهت الأمور بحلول عصر الثدييات. وصياغة المعرفة العامة على هذا الشكل ليست مدهشة، فالناس يحبون تبويب الأشياء ضمن خانات كما في بيت الحمام، وتتابع «العصور» خير مثال على مثل هذا التبويب. ولكن بين المشكلات الكثيرة للرواية السابقة ثمة حقيقة بين الحقائق، هي أن هذا التتابع لا مكان فيه للحمام. فلنغير هذا وندرس ما يمكن أن نسميه عصر الطيور.[1]

إن تطور الطيور موضوعٌ بحثيٌّ ضخم.[2] ولا يزال كذلك موضوعاً بحثياً خلافياً ينقسم إلى مدرستين كبريَين وفق «العقيدة»، إحداهما تعتقد أن الطيور تطورت من ديابسيدات (ثنائيات الفتحات الصدغية Diapsids) غير ديناصورية ذات قرابة إلى واحد من الأشكال العديدة الشبيهة بالزواحف التي كانت الأصل للديناصورات نفسها، في حين تعتقد الثانية أن الديناصورات كانت هي الأسلاف المباشرة للطيور. وهذه المدرسة الأخيرة تلجأ حتى إلى منهجية الكلاديستيات Cladistics (التصنيف التفرعي الحيوي) لدعم رأيها القائل إنّ ما نسميه الطيور هو في الواقع ديناصورات تغيرت كثيراً عن شكلها الأصلي.[3]

إن أعداداً ضخمة من الأحافير لا تشير إلى أن كثيراً من الديناصورات الصغرى المفترسة الماشية على قائمتين تشبه الطيور في طريقة وضع البيض فحسب، بل إن بيوضها أيضاً كانت تشبه بيوض الطيور. والاكتشافات الأخيرة مدهشة أكثر، وهي أن كثيراً من الديناصورات، سواء قبل الظهور الأول للأركيوبتيريكس *Archaeopteryx* أم بعده، أظهرت أدلة على تطور سواعد شبيهة بالأجنحة مكسوة بالريش؛ مما يشير إلى محاولة ثانية للديناصورات لتطوير الطيران. وكان السؤال هو ما إذا كانت هذه الأحفورة الشهيرة ديناصوراً أساساً.[4]

ويعود الجدال إلى ما حول سنة 1996 عندما درس عالم الأحياء القديمة آلان فيدوتشا Alan Feduccia الأحفورةَ المكتشفةَ حينها لما فسّره على أنه طائر عجيب عاش قبل نحو 135 مليون سنة، أي بعد الأركيوبتيريكس مباشرةً. ولم يكن هذا الطائر المُسمى لياونينغورنيس *Liaoningornis* يشبه الديناصورات الطائرة قط؛[5] إذ كانت له عضلات طيران ضخمة متصلة بعظم القص كما هي الحال عند الطيور المعاصرة، لكنه اكتُشف جنباً إلى جنب مع أحافير الطيور الغابرة الشبيهة بالأركيوبتيريكس. فكيف أمكن أن يمضي مثل هذا التطور المتقدم بمثل هذه السرعة؟ فقد استنتج فيدوتشا أن الطيور كانت منتشرة بالفعل عندما ظهر الأركيوبتيريكس أول مرة في الفترة الزمنية قبل ما بين 140 و 135 مليون سنة، وكانت الطيور بحلول تلك المدة قد احتلت موائل بيئية متنوعة. ومع أنها كانت «متقدمة» أكثر من بالأركيوبتيريكس، فإنها كانت لا تزال بدائية جداً وفق معايير الطيور المعاصرة لنا. إذن، فأين هي؟ يعتقد فيدوتشا أن أغلبها انقرض مع الديناصورات قبل نحو 65 مليون سنة، وأن أسلاف الطيور المعاصرة تطورت لاحقاً، ما بين 65 و53 مليون سنة، بصورة مستقلة عن الديناصورات، وهذا ما يُسمّى نظرية الانفجار العظيم للطيور.[6] ويعتبر فيدوتشا وزملاؤه أن أوجه التشابه بين الطيور والديناصورات ناجمة عن التطور المتقارب، أي عندما يؤدي الانتخاب الطبيعي بصورة مستقلة إلى ظهور أشكال متماثلة.

ووفق هذه المدرسة الفكرية ظهرت الطيور المعاصرة متأخرة، إما مع الانقراض الجماعي K-T قبل 65 مليون سنة أو بعده ببضع عشرات الملايين من السنين. ولم تعد هذه النظرية لتطور الطيور تحظى بالاعتراف الواسع في الوقت الحاضر.[7] فخلال العقد الماضي اكتُشِفت أعداد هائلة وتنوع كبير من الطيور في صخور الطباشيري تتراوح أعمارها من 130 إلى 115 مليون سنة مضت، وأغلبها من الصين. ويظهر من دراسة بعض هذه الأحافير أن تنوعاً هائلاً للطيور ذات الأذيال العظمية الطويلة سبق تطور الطيور ذات الأذيال العظمية القصيرة المُعتادة لنا.[8] إلا أن نظرية تطور الديناصورات إلى الطيور حصلت على مزيد من الدعم باكتشاف نوعين من الديناصورات ذات الريش في الصين يعودان إلى ما بين 145 مليون و125 مليون سنة، وكانت متبوعةً بطيور الطباشيري الباكر، الأصغر عمراً.

وفي الواقع، فقد اتجه كمٌّ كبير من الاهتمام العلمي نحو الأبحاث في الريش: أسباب تطوره قبل كل شيء (من حيث وظيفته) وكيف ظهر ريش الأجنحة الضروري للطيران في المقام الأول؟ ويشمل كثير من هذه الأبحاث مفهوم التكيف، أي عندما يُستغل تكيُّفٍ معين لأداء وظيفة تختلف عن الوظيفة الأصلية. ونعرف جميعنا قيمة الريش في السترات الشتوية والبطانيات، فمن الواضح أن الريش عازل حراري جيد يحافظ على الدفء، لكن الريش المستخدم للدفء يختلف كثيراً عن ذلك الضروري والمستخدم فعلاً من أجل الطيران. ونادراً ما يبقى الريش محفوظاً بعد النفوق، مثله مثل كثير من المواد الأخرى في علم الأحافير، ويبقى السجلّ الأحفوري ذا فائدة محدودة في استكشاف منشأ الريش ومظهره الأول. ولكن في هذه المرة، وكما حدث مراراً خلال العقد الماضي، جاءت الأحافير من الصين لنجدتنا؛ ففي هذه الحالة هناك أحافير ديناصورات رائعة ريشها محفوظ،[9] وفي أحيان أخرى (ليس من الصين فقط) أنسجتها الرخوة محفوظة أيضاً.[10] فالأدلة المتعلقة بتطور الطيور لا يمكن - ربما باستثناء بعض الحالات النادرة - أن تحظى بالقبول دون صخب المنشقين وصراخ المعارضين.[11] وتطور الطيران (وليس مجرد التحليق Gliding) ابتكاراً عظيماً اخترعته بصورة مستقلة مفصليات الأرجل والزواحف والديناصورات (إصدار الطيور) والثدييات، كان ولا يزال موضوعاً بحثياً مثمراً.[12]

وفي الوقت الحاضر نعرف أكثر من 120 نوعاً من الطيور من الحقبة الوسطى من جميع القارات عدا البر الرئيس لقارة إفريقيا.[13] وعلى الرغم من هذه المعلومات الجديدة، فلا يزال هناك جدال حول عددٍ من المسائل المتعلقة بتطور الطيور، بما في ذلك توقيت ومصدر تنوع الطيور الحديثة Neornithes.[14]

الطيور المكتشفة في أقدم الفترات الزمنية للطباشيري (ويقسم إلى الطباشيري الباكر الذي بدأ قبل نحو 145 مليون سنة وانتهى قبل نحو 100 مليون سنة، وتبعه الطباشيري المتأخر بين 100 إلى 65 مليون سنة مضت). ومن المفترض أن طيور الطباشيري الباكر تطورت بسرعة إلى طيف واسع من الأشكال والأحجام. وكان بعضها بحجم غراب ذي منقار قوي، مثل طائر الكونفيوشسورنيس *Confuciornis*، وكانت له أيضاً مخالب ضخمة في جناحيه. وطيور أخرى من الوقت نفسه مثل سيبيورنيس *Sapeornis* كانت لها أجنحة طويلة وضيقة كما عند النورس. كما

كانت هناك طيور أصغر مثل إيونانتيورنيس *Eoenantiornis* وأيبيروميزورنيس *Iberomesornis* بحجم العصفور الدوري Sparrow. ومع كل التحسينات في الطيران، كان لا يزال عند هذه الطيور من الطباشيري الباكر فكان ذوا أسنان تشبه فكي الأركيوبتيريكس. إلا أن تنوع الجماجم والأجنحة والأقدام يشير إلى أن هذه الطيور الطباشيرية الباكرة كانت قد تطورت إلى أشكال اختصاصية متنوعة من أجل شتى أساليب الحياة المختلفة، بما في ذلك التغذية بالبذور أو الأسماك أو الحشرات أو الرحيق أو اللحم. وتوحي أجنحتها وأقفاصها الصدرية أن الطيور طورت القدرة على الطيران بعد الأركيوبتيريكس بقليل، ولا تختلف في طيرانها كثيراً عن الطيور المعاصرة.

ومع كل التحسينات التي طرأت على طيور الطباشيري الباكر، فقد حافظت على الأسنان، وهذا من الملامح القديمة. والطيور المعاصرة كلها تملك مناقير قرنية ذات أشكال متنوعة تمثل تكيفاً لمختلف أنماط التغذية عند الطيور المعاصرة. فمتى ظهرت الطيور عديمة الأسنان لأول مرة؟ يبقى هذا سؤالاً خلافياً، وربما حصل على إجابة تواً في المكبات الباردة لشبه جزيرة أنتاركتيكا.

تطورت الطيور عديمة الأسنان المعاصرة من أسلاف لها أسنان في الطباشيري. إلا أن هذا لم يكن استبدالاً بل إضافة؛ لأن الطيور البدائية الباكرة التي كانت لها أسنان وذيول طويلة ما زالت تزدهر ويتزايد تنوعها جنباً إلى جنب مع الزواحف المجنحة للطباشيري، بما فيها أضخم الكائنات الطائرة السائدة في النصف الأخير من الطباشيري، أيْ البتيروصورات. واستمرت بقايا الطيور ذات الأسنان حتى نهاية الطباشيري، لكنها تعرضت للانقراض النهائي في حدث الانقراض الجماعي K-T على الأقل وفق التجميع الأحدث لأحافير الطيور الموجودة في أكثر طبقات الطباشيري كمالاً في الداخل الغربي للولايات المتحدة، وهو تشكيل هيل كريك، موطن التريسيراتوبس والتيرانوصور ريكس وعدد هائل من الطيور التي كانت لا تزال بدائية.

وكانت سلالات الطيور التي بقيت على قيد الحياة هي قديمات الفك Paleognathae، وتشمل الطيور الكبيرة غير القادرة على الطيران مثل النعامة والريا Rhea والشبنم Cassowaries إضافة إلى العمالقة الحقيقية التي فاتتنا رؤيتها، وهي الموا Moa الضخمة من نيوزيلندا وطائر الفيل Elephant bird من مدغشقر اللذان أبادهما البشر خلال الألف سنة الماضية. وبعض الطيور الشائعة في يومنا مثل البط المائي والطيور البرية وأفضل الطيور طيراناً اليوم، وهي الطيور الجديدة، تعود جذورها إلى قديمات الفك.

لقد اكتُشف مؤخراً في صخور تشكيل هيل كريك Hell Creek Formation والصخور المكافئة لها في أمريكا الشمالية ما مجموعه سبعة عشر نوعاً، بما فيها سبعة من أقدم أنواع الطيور الغابرة، منها الطيور الغاطسة ذات الأسنان التي تنتمي إلى مجموعة الطيور الغربية Hesperornithes المُسماة على اسم الطائر الغاطس البدين الذي يبلغ طوله أربع أقدام، وهو الطائر هيسبرورنيس *Hesperornis*. وتشمل المجموعة المكتشفة الأشكال الصغرى وبعضاً من أضخم الكائنات الطائرة المعروفة من الجوراسي أو الطباشيري، وهذا يؤكد بوضوح أن جزءاً كبيراً من تنوُّع الطيور قد حدث خلال نهاية سيادة الديناصورات.

وفي الواقع، يبدو أن «الحيوانات الطيرية» من هذه الصخور مُنحاز بشدة نحو الطيور البحرية، وهذا متوقع بسبب البحر الداخلي القريب الذي صاغ أمريكا الشمالية لتشكل شبه قارتين كبيرتين خلال الطباشيري المتأخر. فلم يبق أي من هذه المجموعات على قيد الحياة في الباليوجين، ووجودها في تشكيل هيل كريك الذي يشمل آخر 2-3 ملايين سنة من العصر الماستريختي للطباشيري المتأخر يدلنا على أن الانقراض الجماعي للطيور القديمة وَقَع فعلاً بالتزامن مع اصطدام كويكب تشيكشولوب.[15] فلا يزال هناك جدل في الموضوع: فبينما تمثل معظم الطيور الموجودة في أسرّة أمريكا الشمالية الطيور «المتقدمة» من وجهة النظر المورفولوجية، فإنه لا يمكن تصنيف أي منها ضمن المجموعة بالغة الأهمية، وهي الطيور الحديثة Neornithes. فهذه الحيوانات الطيرية هي الأكثر تنوعاً في الطباشيري المتأخر، مع أن تنوعه وتباينه (أي عدد أنواع مخططات الجسم) أقلّ منه عند الطيور المعاصرة. ولكن هذه المجموعة من الأحافير أساسيةٌ لمساعدتنا على فهم مدى تأثير حدث الانقراض الجماعي K-T في الطيور.

لو استطاعت أي مجموعة من الفقاريات أن تنجو من تأثيرات الانقراض الناجم عن الاصطدام؛ لكانت هي الطيور بالتأكيد. وإذا احتراق أغلب غابات

العالم خلال الأيام القليلة الأولى بعد اصطدام الصخرة العظيمة من الفضاء بالأرض؛ والمطر الحمضي التالي المتبوع بستة أشهر من الظلام، ومن ثمّ تجويع واجتثاث جميع الأنظمة الإيكولوجية على اليابسة إضافة إلى المملكتين في المياه البحرية والعذبة، باستثناء مجتمعات أعماق البحار، كانت تأثيرات هذا الاصطدام هائلة. وحتى مجتمعات أعماق البحار عانت معاناة شديدة بسبب تباطؤ المصدر الرئيس للغذاء في أعماق البحار أو توقفه، وهو الأجسام الغارقة للعوالق من الطبقات السطحية والحيوانات الميتة. فعلى اليابسة كان حجم الحيوانات يحدد قدرتها على النجاة، ولم تكن للحيوانات الكبرى فرصة؛ لكن الطيور لم تكن حيوانات كبيرة.

وباعتبار قدرة الطيور على الانتشار السريع والطيران الخاطف إلى الأراضي هي الأقلّ تأثراً، فمن المتوقع أن الطيور كمجموعة يفترض أن تكون معدلات انقراضها أقلّ منها عند الحيوانات غير القادرة على الطيران، بما في ذلك الطيور غير القادرة على الطيران. للأسف، نادراً ما تتأحفر هياكل الطيور لأن عظامها هشة جوفاء، ومن ثم فإن أحافير الطيور نادرة أصلاً. ولكنْ، بفضل المثابرة العظيمة على الاكتشاف والتجميع، لدينا الآن معلومات كافية لتشكيل تخميناتٍ عن علمٍ حول مصير الطيور خلال الانتقال من الحقبة الوسطى إلى الحديثة، ذاك الانتقال المسجل بالنار في تاريخ الحياة.

وبحلول نهاية الطباشيري كانت الطيور موجودة على الأرض لوقت أطول مما انقضى بعد أن أدى اصطدام تشيكشولوب العظيم إلى تحويل العالم الغني بالديناصورات إلى عالم لم يبق فيه إلا ديناصورات الطائرة.

انقسام الطيور العظيم

وهناك مصدر آخر للمعلومات عن توقيت تنوُّع الطيور المعاصرة، وهو استخدام الحمض النووي DNA. وقد طرحت دراسات مستقلة عن بعضها في العقد الأول من القرن الحادي والعشرين[16] «شجرات تطور» جديدة للطيور بناء على الحمض النووي DNA للأنواع الموجودة (التي يفترض أنها تطورت من الطيور الناجية من أزمنة الطيور القديمة)، واحتوت هذه الشجرة الجديدة على عدد من المفاجآت. فمثلاً، أقرب أقرباء طيور الماء العذب الغاطسة الشائعة المعروفة بالغطاسيات

grebes هو النحام (الفلامينغو) Flamingos! وتبيّن أن الطنّان Hummingbird هو شكل متخصص للبومة Nighthawk، في حين أن الصقر أقرب إلى الطيور المغردة Song birds من قرابته إلى الباز Hawk والعقاب Eagles. ومهما كانت هذه الاستنتاجات مفاجئة، فهناك مفاجآت أخرى أعظم من تلك الدراسات.

وعلى مسار المثال، تضع الشجرة الجديدة رتبةَ الطيور الطائرة المعروفة بالتيناميات Tinamous على فرع الشجرة الذي تشاركه مع النعامة والإيمو والكيوي التي لا تستطيع الطيران. وتكمن أهمية هذا في أن عدم القدرة على الطيران تطور مرتين على الأقلّ ضمن هذه السلالة، أو أن التينامو طورت القدرة على الطيران مجدداً من سلف غير قادر على الطيران. وإضافة إلى ذلك، فقد بيّنت الشجرة الجديدة أن أقرب أقرباء الجوائم Perching birds، أي العصفوريات Passerines (وهي أكبر رتب الطيور وأكثرها نجاحاً) هي الببغاوات. ومع كل هذه المعلومات الجديدة، فإن عمر الانشطار الأساسي بين الطيور الموجودة الناجية من الانقراض الجماعي، أي التفرع في طريق التطور الذي أدى إلى انفصال جديدات الفك عن قديمات الفك التي تعتبر أكثر بدائيةً، لا يزال مبهماً.

وتُصنَّف الطيورُ المعاصرة ضمن طائفة الطيور الجديدة Neornithes التي لم يعرَف عنها إلا مؤخراً أنها تطورت إلى بعض السلالات الأساسية بنهاية الطباشيري، وذلك بناء على اكتشاف أحافير طائر يُسمّى الآن فيغافيس *Vegavis* من جزيرة فيغا. وتنقسم الطيور الجديدة إلى قديمات الفك (التينامو والنعامة والإيمو والكيوي) وجديدات الفك Neognaths (وهي باقي الطيور). وتاريخ انفصال جديدات الفك نحو الطيور المعتادة اليوم غير معروف تماماً. وتشير أفضل الأدلة إلى أن الانفصال الأساسي في الطيور الجديدة حدث قبل الانقراض الجماعي K-T؛ ولكن، إن حدث قبله أساساً، فبأي وقت قبله؟ كما أشرنا سابقاً، لا تزال هناك جماعة مقتنعة بقوة (منها آلان فيدوتشا) بأن الطيور المعاصرة لم تتطور إلا بعد حدث الانقراض الجماعي K-T، كما أن هناك من يشك فيما إذا كان تشعُّب جديدات الفك قد حدث قبل انقراض الديناصورات الأخرى أم بعدها.

إذن، فالنتائج الجديدة من جزيرة فيغا في القارة القطبية الجنوبية حاسمة. وجزيرة فيغا هي جزيرة صغيرة إلى الشمال من جزيرة جيمس روس التي أعطت

في الماضي بعضاً من أهم الموجودات المتعلقة بتطور الطيور، وقدّم هذا الاكتشافُ الدليلَ الأولى على أن الطيور المعاصرة كانت معاصرة للديناصورات غير الطيرية في نهاية الطباشيري.

وثمّة سؤال أخير يؤرق علماء الأحافير منذ سنين. ففي منتصف الحقبة الحديثة حاولت الطيور أن تتحول إلى ديناصورات مفترسة عملاقة مرة أخرى، وكان أشهرها «طيور الرعب» Terror birds. فمن الواضح أنه كان هناك تنافس حادّ مع اللواحم الصاعدة آنذاك، أسلاف جميع الثدييات البرية اللاحمة اليوم (مجموعات الكلاب والقطط والدببة وبنات عرس).

إن تطور الطيور الضخمة غير القادرة على الطيران (أشباه النعام) الموجودة في عصرنا، مثل النعامة والشبنم والريا وغيرها، كان يبدو دائماً وكأنه رجعة إلى خطة جسم الديناصورات المتحركة على قدمين. ولكن، لما كانت هذه الطيور العملاقة لا تستطيع أن تقفز من جزيرة إلى أخرى أو تقطع القارات الواسعة ضمن حركات هجرة تشيع بين الطيور القادرة على الطيران في الماضي والحاضر، فقد افتُرض أن كل واحدة من مجموعات الطيور الكبرى غير القادرة على الطيران قد تطورت بصورة مستقلة من خلال تشكيل أنواع منعزلة. ولما كان معظم أنواع هذه الطيور موجودا في القارات التي تقع اليوم في نصف الكرة الجنوبي، وهذه القارات كانت في الحقبة الوسطى مندمجة ضمن كتلة ضخمة وحيدة من اليابسة، فقد نستنتج أن النعامة في إفريقيا والريا في أمريكا الجنوبية والشبنم في أستراليا كلها نواتج تحطم كتلة اليابسة القديمة التي نسميها غوندوانالاند. ولكن المفاجأة الكبرى من تحليل الحمض النووي DNA هي أن هذه الطيور غير القادرة على الطيران لم تتطور إلى هذه المجموعات بعد أن فقدت قدرتها على الطيران، بل قبل ذلك.[17]

ولما كانت إفريقيا ومدغشقر من قطع اليابسة الكبيرة الأولى المنفصلة عن القارة الفائقة غوندوانالاند، كان من المتوقع أن الانعزال الباكر لإفريقيا ومدغشقر يسمح للتطور بتوليد أقدم أنواع أشباه النعام، مثل النعامة في إفريقيا وطائر الفيل الأضخم منها في مدغشقر القديمة. ونتيجةً لقرب مدغشقر من إفريقيا، فمن المفترض أن تكون القرابة بين النعامة وطائر الفيل وثيقة، في حين أنهما

يتميزان عن الطيور الأخرى غير القادرة على الطيران، بما فيها تلك في أمريكا الجنوبية ونيوزيلندا حيث تطور الموا (المنقرض حالياً) والكيوي الذي لا يزال موجوداً، كلّ منهما في عزلته، أو هكذا كان يفترض. ومع توفر الحمض النووي DNA جاءت المفاجآت.

لقد بيّنت تحاليل الحمض النووي DNA أن طائر الفيل من مدغشقر كان أقرب إلى طيور نيوزيلندا مقارنة بقربه من النعامة الإفريقية القريبة جغرافياً. وتدعم هذه النتيجة غير المتوقعة بقوة الاستنتاج بأن هذه المجموعات تمايزت تطورياً قبل أن تفقد قدرتها على الطيران.

إن الطيور الكبيرة من أشباه النعام الموجودة في أيامنا هي أمثلة على الطيور الضخمة الشبيهة بالديناصورات في الماضي. وكانت لأكبر طيور اليابسة المنقرضة حالياً عودة تطورية إلى مخطط جسم الديناصورات اللاحمة الماشية على قائمتين من الحقبة الوسطى. وقد تطورت طيور الرعب المعروفة علمياً بـ فوروسراسيدي *Phorusracidae* في أمريكا الجنوبية قبل نحو 60 مليون سنة واستمرت حتى نحو مليوني سنة قبل الوقت الحالي، وهو الوقت الذي كانت فيه طبقات الجليد العظيمة تنتشر في أنحاء الكرة الأرضية خلال العصر الجليدي البليستوسيني الأول. فقد وصل بعض هذه الطيور إلى أمريكا الشمالية أيضاً، وبقيت خلال أغلب الحقبة الحديثة اللواحم العليا في أمريكا الجنوبية. ولا يوجد حاليا أي شيء يشبه طيور الرعب، وهذه نعمة حقاً.

وفي عام 2010 قدم بحث أجري باستخدام التصوير بالأشعة المقطعية فهماً جديداً عن كيفية حياة وموت هذه العمالقة. فقد بينت الصور الطبقية أن المناقير الضخمة لهذه الكائنات المفترسة الفظيعة كانت جوفاء، وهذا لم يكن متوقعاً، فمثل هذا المنقار الأجوف يفترض أن يكون ضعيفاً وعرضة للكسر عند تحريكه بحركة جانبية. ولكنْ من المحتمل أنها استخدمت منقارها كالفأس، كما استفادت من قوائمها القوية ذات المخالب الضخمة لقتل فرائسها.

وكانت أجنحة طيور الرعب صغيرة ضامرة، كما هي الحال عند أغلب الطيور غير القادرة على الطيران، لكن قوائمها كانت طويلة وقوية تنتهي بأقدام ضخمة ذات مخالب. وكانت القوائم ذات العضلات القوية تُؤمِّن سرعة جري هائلة على

الأرض؛ وتشير التقديرات إلى أن بعض أنواع طيور الرعب كان يمكن أن يصل إلى سرعات تقارب سبعين ميلاً في الساعة [110 كم/ساعة] على أرض سهلة، وكان مجال الركض واسعاً في سهول البامبا بأمريكا الجنوبية، ويمكن مقارنتها في هذا بالفهد. إن اجتماع سرعة الركض والمنقار الفظيع والمخالب القاتلة على القوائم القوية جعلت من طيور الرعب كائنات مفترسة ناجحة جدا.

رؤوسها كانت كبيرة جداً ودماغها أكبر من دماغ أي طائر آخر، وهذا يؤدي إلى بعض الاستنتاجات غير المريحة. فقد اضطر المختصون بالعلوم العصبية وعلماء النفس بعد الأبحاث الأخيرة في ذكاء الببغاء الإفريقي الرمادي إلى الإقرار بأننا كنا نبخس تقدير مستوى ذكاء الطيور إلى حدّ بعيد. وبينما يسعى المختصون بالرئيسيات إلى كشف الوظائف المعرفية الراقية عند شتى القردة، يبدو أن الطيور عموماً، وربما طيور الرعب تحديداً، كانت من أذكى الأنواع في تاريخ الأرض.

19

البشرية والانقراض العاشر: من 2.5 مليون سنة حتى الآن

صدر منذ بضعة عقود عددٌ من الكتب التي كانت تقول إن العالم قد يكون في بداية انقراض جماعي جديد (بما فيها كتابان بقلم وورد أحد مؤلفي هذا الكتاب وهما: نهاية التطور *The End of the Evolution* وتحديث لذلك الكتاب بعنوان أنهار الزمن[1] *The Rivers of Time*). وكان واحدٌ من هذه الأعمال، وهو الانقراض السادس *The Sixth Extinction* بقلم ريتشارد ليكي،[2] يشير صراحةً إلى الانقراضات الجماعية الخمسة التي استعرضناها في هذا الكتاب، تلك التي حدثت فيها خسارة تفوق خمسين في المئة من الأنواع، وهي الحوادث في نهايات الأوردفيشي والديفوني والبرمي والترياسي والطباشيري. ونرى أنه حدث في الواقع عشرة انقراضات جماعية كبرى يؤهلها مداها لتمييزها عن حوادث أصغر مثل الحدث الحراري الباليوسيني الإيوسيني **PETM** الموصوف في فصل سابق وعدد من الحوادث الصغيرة نسبياً خلال العصرين الجوراسي والطباشيري، وهذه الحوادث الكبرى العشرة هي:

1. انقراض الأكسجة العظيم: وربما يكون أكثر الانقراضات كارثيةً من حيث النسبة المئوية للأنواع والأفراد المنقرضة، فقد كان الأكسجين سمّاً قاتلاً لجميع الميكروبات تقريباً في ذلك الزمن. وبما أنه كاد يتزامن مع أول أرض كرة ثلج، فقد يكون أسوأ الانقراضات قاطبة، كما أنه أول الانقراضات. تصور أنك تمشي وفجأة لا يعود هناك هواء. الصواب، إنه هواء لكنه مختلف. فهذا ما حدث لتلك الكائنات المائية التي كانت تشكل الحياة على الأرض. فقد امتلأت البحار بغاز سامّ هو الأكسجين.

2. الانقراضات الكريوجينية *Cryogenian*: مجموع حوادث أرض كرة الثلج التي حدثت في نهاية دهر الطلائع، ويغطي الجليد الثخين المتسخ المحيطات واليابسة، والبناء الضوئي يتباطأ بل يتوقف في أغلب الأحيان. وينقرض التجمع المتنوع الغني من الكائنات الحية على اليابسة وفي البحار (وذاك الذي في البحار أكثر تنوعاً بكثير) تماماً؛ فيتدهور التنوع والكتلة الحيوية أيضاً.

3. الانقراض الفندي الإدياكاري المتأخر *late Vendian-Ediacaran*، وشمل الستروماتوليت والحصائر الميكروبية، ولا سيما الكائنات الإدياكارية على الحدّ الفاصل بين دهر الطلائع وحقبة الحياة القديمة. وهذا يفترض أن حديقة الإدياكارا قد اجتاحتها الحيوانات النَّهِمة - والأهم من ذلك أنها نشيطة متحركة - التي تلتهم كل شيء في طريقها؛ فتغزو المحيطات واليابسة المغطاة بطبقات من الميكروبات بطيئة الحركة.
4. انقراض الانحراف الإيجابي الستيبتوني لنظائر الكربون *Cambrian SPICE* في أواخر الكامبري: انقراض أغلب التريلوبيت والعديد من «العجائب المدهشة» في طَفَل بيرغِس وغيرها. والأهمّ في الموضوع هو تغير التريلوبيت بالجملة من الأشكال ذات التقطع البدائي والعيون البدائية، التي لا تستطيع التكوُّر دفاعاً عن نفسها وذات الزخرفة الدفاعية القليلة. وحدث هذا غالباً نتيجة زيادة أعداد الكائنات المفترسة بنفس درجة تأثير العوامل الأخرى. وقد شاركت في تسبيب هذا الانقراض أوائلُ اللواحم الكبيرة المتحركة المدرعة حقاً، وهي رأسيات الأرجل النوتيوليدية Nautiloid cephalipods، كما شاركت فيه التغيرات الكيميائية.
5. الانقراض الجماعي الأوردفيشي: انقراض الأنواع المدارية بالجملة، بسبب البرد أو ربما تغير مستوى سطح البحر.
6. الانقراض الجماعي الديفوني. حيوانات القعر وعمود الماء في المحيطات: أول انقراض بغازات الدفيئة؟
7. الانقراض الجماعي البرمي: انقراض بري وبحري بغازات الدفيئة.
8. الانقراض الجماعي الترياسي: انقراض بري وبحري بغازات الدفيئة.
9. الانقراض الجماعي الطباشيري الباليوجيني: انقراض نتيجة تشارك الدفيئة والاصطدام.
10. الانقراض الجماعي البليستوسيني المتأخر الهولوسيني: من 2.5 مليون سنة حتى الآن، نتيجة تغير المناخ ونشاطات البشر.

ما يجب أن يثير قلقنا هو البند الأخير في القائمة، فالانقراضات الأخرى، ولا سيما الانقراضات بغازات الدفيئة، يفترض أن ترعبنا، لكنها لا ترعبنا لأنها كانت -وستكون- بطيئة

جداً. فالموت البطيء الذي... لا يمس نوعنا. نحن مقاومون للانقراض إلى حدّ كبير. وسنبقى أحياء، ولكن هل سنعيش في هناء؟ على كوكب فارغ؟ تحيط بنا حيواناتنا ونباتاتنا الداجنة التي ستؤدي جيناتها القافزة إلى انفجار كامبري جديد شاذ وغير متوقع العواقب على المدى الطويل.

وصولاً إلى الانقراض العاشر

وفي عام 2010 وصلت إلى الولايات المتحدة ضمن معرض متنقل من إثيوبيا[3] واحدةٌ من أشهر الأحافير قاطبةً، وهي لوسي، ممثلة للهومينيد Hominid (أشباه البشر) المبكرين.[4] فلم يبق الكثير محفوظاً من لوسي البالغة من الطول نحو ثلاث أقدام ونصف [105سم]، نحو أربعين في المئة من إجمالي هيكلها العظمي فقط، لكننا عرفنا منها كثيراً.

ثنائية الشكل الجنسي Sexual dimorphism مصطلح يصف اختلاف الشكل بين الذكور والإناث ضمن نوع معين. وبكل تأكيد لا تقتصر على القردة العليا، ولا يشترط أن أكبر الجنسين هو الذكر. ففي كثير من الحيوانات، مثل كثير من رأسيات الأرجل (عدا النوتيلوس، وهي حقيقة شائقة)، يكون الشكل الأنثوي هو الأكبر. ويبدو أن كتلة الأعضاء اللازمة لإنتاج البيوض أكبر من تلك اللازمة لإنتاج الحيوانات منوية. أما في القردة العليا، بمن فيهم نحن البشر؛ فإن الذكر هو الأكبر. وثنائية الشكل عند البشر معتدّ بها إحصائياً، إذ يتراوح طول النساء على ما يبدو بين نحو 90 و92 في المئة من طول الرجال، حسب العرق. ولكن في النوع الذي تنتمي إليه لوسي كان الوضع مختلفاً تماماً.

لوسي ليست الهيكل العظمي المكتشف الوحيد من نوعها، فهذا النوع، أوسترالوبيثيكوس أفارنسيس *Australopithecus Afarensis*، صار معروفاً أفضل بكثير مقارنة بعلمنا (أو جهلنا) عنه عندما اكتشف فريق بقيادة دون جوهانسون Don Johanson لوسي في عام 1974. ومن أحدث المكتشفات هيكل عظمي لذكر من نوعها، وهو كامل إلى حدّ كبير ليسمح بتقدير جيد لطوله عندما كان لا يزال حيّاً. وقد سَمّوه الرجل الكبير Big Man، وكان طوله خمس أقدام [نحو 150سم] مقابل ثلاث أقدام ونصف في لوسي. لو وقفت أمامه؛ لوصل ذقنها إلى مستوىً أعلى بقليل من سرّته، ووجهها مقابل الجزء السفلي من صدره.

إذا كان الرجل الكبير ولوسي ممثلين لجنسيهما عند أوسترالوبيثيكوس أفارينسيس، فهذا يعني أن طول الإناث كان سبعين في المئة فقط من طول الذكور. ويفترض أن تكون لهذا عواقب سلوكية وثقافية. ففي عام 2012 أجرت عالمة الأنثروبولوجيا باتريشيا كرامر Patricia Kramer من جامعة واشنطن دراسة تفصيلية[5] حول سرعة المشي النسبية عند الذكور والإناث بناءً على طول الساق؛ فاكتشفت أن سرعة المشي المثلى عند الرجل الكبير كانت 2.9 ميل في الساعة [4.6كم/ساعة]، أما عند لوسي فكانت أبطأ بوضوح، 2.3 ميل في الساعة [3.7كم/ساعة]. ومن ثم، فالمشي جنباً إلى جنب مع الذكور كان شاقاً على الإناث، وعندما تعيش في عالم ممتلئ بالحيوانات المفترسة فلن يكون البقاء الدائم في حالة التنفس اللاهوائي تكتيكاً ملائماً للبقاء على قيد الحياة. فافترضت كرامر أن الذكور والإناث عند القردة العليا كانت تقضي أغلب وقتها منفصلة عن بعضها، وهي تقوم بتجميع الغذاء أو صيده، أي مثل الشمبانزي اليوم.

وهناك اكتشافات جديدة من إفريقيا تقلب آراءً كانت تبدو مستقرة. غالباً ما تُصوَّر لوسي وأفراد نوعها في الصور والنماذج المُجسَّمة على أنهم يسيرون على قدمين في عالم البليوسين المتأخر في شرق أو شمال إفريقيا، في أماكن فيها مساحات من السهول العشبية مع رقع من الغابات المفتوحة. ولكن اكتشاف عظم الكتف لأنثى من نوع لوسي، قبلها بنحو مئة ألف سنة، بيّن أنها ونوعها كانوا من متسلقي الأشجار إضافة إلى تكيفهم مع المشي على الأرض. وكان السؤال عما إذا كان أسلافنا القدامى هؤلاء يقضون وقتاً طويلاً على الأشجار يثير جدالات حامية،[6] ذلك أنه قبل هذا الاكتشاف الجديد لم يكن هناك مسار لرؤية التلاؤمات الضرورية لمتسلقي الأشجار. ويوحي المشهد الجديد أن الأوسترالوبيثيكات ربما نزلت من الأشجار في وقت متأخر أكثر مما كان يعتقد سابقاً.

وبينما كان الهومينيد Hominids وافدين جدداً على الأرض، فإن مجموعتنا، مجموعة الرئيسيات، تعود آثارها إلى الطباشيري، وعندنا السلف، هو البرغاتوريوس *Purgatorius*، الذي نجا خلال انقراض الجماعي K-T، وهذا من حسن حظنا. فقد كان بعضٌ من أقدم الرئيسيات ينتمي إلى فرع الليمور. وقبل نحو 45 مليون سنة ظهرت رئيسيات أكثر تقدماً، أشباه البشر الحقيقية True Anthropoids التي تشمل اليوم السعادين والقردة والبشر، في السجل الأحفوري في آسيا، وأقدمها اكتُشف في الصين ويُسمّى الآن إيوزمياس (قرد الفجر) *Eosimias*.

وقبل نحو 34 مليون سنة، تطورت نسانيس Monkeys أذكى بالتأكيد وأكبر بوضوح وربما أكثر عدوانية. وكانت لأحدها، المُسمى كاتوبيثيكوس *Catopithecus*، جمجمة بحجم جمجمة قرد صغير ووجه مسطح نسبياً، وكان النوع الأول من الرئيسيات لديه أسنان مماثلة للبشر: قاطعتان وناب واحد واثنان من الضواحك وثلاث رحويات. وعندنا الآن فكرة جيدة حول شجرة تطورنا وصولاً إلى المكان والوقت اللذين يمكن أن نقول عنهما إن البشر Humans ظهروا فيهما، الأصل الإفريقي للأوسترالوبيثيكيات.

لقد بذل الباحثون في علم الإنسان القديم جهوداً مشكورة في كشف زمن ومكان حدوث الانتواع Speciation الذي أدى إلى ظهور نوعنا البشري. ويبدو أن عائلة البشر التي تسمّى القردة العليا أو هومونويدي (الأناسي) أو Hominidae قد ظهرت قبل نحو 56 مليون سنة مع ظهور لوسي ونوعها الأوسترالوبيثيكوس آفارينسيس الموصوف سابقا. ومنذ ذلك الحين كانت في عائلتنا تسعة أنواع، مع أن هناك جدالاً مستمراً حول هذا العدد الذي يبدو أنه قد يتغير مع ظهور الاكتشافات الجديدة والتفسيرات الجديدة للعظام القديمة ووصولها إلى النشر. ولكن أهم خلف لأقدم القردة العليا التي عاشت قبل البليستوسين هو العضو الأول من جنسنا جنس هومو *Homo*، النوع المسمّى الإنسان الماهر *Homo habilis* لقدرته على استخدام الأدوات، وكان هذا قبل نحو 2.5 مليون سنة. ونتج من هذا الكائن هومو إيركتوس (الإنسان المنتصب) *Homo erectus* قبل نحو 1.5 مليون سنة، والإنسان المنتصب هو الذي خلّف نوعنا هومو سابينس (الإنسان العاقل) *Homo sapiens* قبل نحو 200 ألف سنة إما مباشرةً، أو من خلال وسيط تطوري معروف بـ هومو هايديلبيرغ (إنسان هايدلبرغ) *Homo heidelbergensis*. وتابع نوعُنا الانقسامَ إلى عدة ضروبٍ منفصلة. ويعتبر بعض الباحثين النياندرتال ضرباً في حين يعتبره بعضهم الآخر نوعاً منفصلاً يسمّونه هومو نياندرتال (إنسان نياندرتال) *Homo neanderthalensis*. والدراسات الحديثة التي أُجريت على الحمض النووي DNA للنياندرتال[7] المكتشف بعد قراءة تسلسله هي من أكثر أوجه بيولوجيا الإنسان القديم تشويقاً، وتشير الأدلة الأخيرة إلى أن سلالات الإنسان والنياندرتال قد انفصلت قبل ظهور البشر المعاصرين والحمض النووي DNA الخاص بنا. لا هُم أسلافنا ولا نحن أسلافهم، بل تطورنا كلانا من سلف مشترك منقرض يختلف عن كلا النوعين.[8]

لقد حدث تشكُّل كل نوع جديد من الإنسان عندما انفصلت جماعة صغيرة من الهومينيد بشكل أو بآخر عن جمهرة أكبر لأجيال عديدة. وفي ستينات القرن العشرين

وسبعيناته كان هناك رأي مفاده أن البشر المعاصرين ظهروا من خلال ما يسمّى طراز الشمعدان للتطور، أي إنه في كل أنحاء الأرض تطورت جماعات منفصلة من القردة العليا مثل هومو إيركتوس إلى هومو سابينس في أماكن وأزمنة مختلفة. أما في الوقت الحاضر؛ فيبدو هذا الرأي غريباً.

ويخبرنا السجل الأحفوري أن أقدم عضو من نوعنا حتى الآن، ويسمّى أحياناً الحديث Modern لتمييزه عن أشكال أقدم من هومو سابينس، قد عاش قبل 195 ألف سنة فيما يسمّى حالياً إثيوبيا. ومن غير المعروف، وليس في غاية الأهمية أن نعرف، ما إذا كانت هذه الأحافير تمثل أقدم قبيلة منّا أم كانت تنتمي إلى جماعة تتجول من مكان منشئها الحقيقي، وصدف أن رفات أفرادها تأحفر في إثيوبيا. بعد وقت قصير شرعت هذه الجماعة بالتوسع إلى أقصى جنوب القارة الإفريقية ثم إلى شمالها أيضاً واكتشفت الطريق من إفريقيا عبر أوراسيا، وهكذا انتشروا حول الكرة الأرضية،[9] فانعزلوا بصورة فعالة عن الجماعات الأخرى من نوعنا، ومن ثم تلاءموا مع شتى الظروف البيئية المختلفة التي وجد فيها هؤلاء الرّحّل أنفسهم. وكانت تلك التلاؤمات المختلفة، من مورفولوجية إلى فيسيولوجية، والضرورية للبقاء على قيد الحياة في الشمال الفقير بالشمس والمغطى بالجليد، غير تلك المطلوبة للعيش في سهول إفريقيا أو في المناطق بين هذين الإقليمين. ومع زيادة أعدادنا ازداد تنوعنا أيضاً والتغيرات التطورية المتنوعة التي طرأت علينا، إلا أن كل هذا حدث ضمن نوع species واحد.

العصر الجليدي الأخير والحياة

لوقت طويل بقي علماء المناخ يضعون النظريات التي تقول إنّ التغيرات المناخية المشاهدة خلال آخر مليونين ونصف من السنين، أي التناوب بين فترات طويلة من المناخ البارد جداً مع تنامي طبقات الجليد وانخفاض مستوى سطح البحر، وبين فترات أقصر من الدفء، كانت نتيجة تغيرات مدار الأرض الموصوفة سابقا، كما وصفها لأول مرة ميلوتين ميلانكوفيتش Milutin Milankovic. وكان يُعتقَد أن هذه التغيرات كانت بطيئة إلى أن ظهر تحليل العينات الأسطوانية الجليدية التي تعطي قدرة غير مسبوقة على تمييز التغيرات المناخية خلال الأزمنة الأخيرة. ومع توفر مثل هذه القدرة على التمييز، فقد تطورت آراء جديدة.

وتشير سجلات العينات الأسطوانية الجليدية وغيرها من مصادر المعلومات عن المناخ - مثل السجلات الأحفورية وسجلات النظائر المشعة من أعماق البحار - إلى أنّ الفترات بين الثلاجات الجليدية (الكتل الجليدية)، أي الأوقات الأكثر دفئاً بين العصور الجليدية الأبرد بكثير، استمرت في المعدل نحو 11 ألف سنة. وهذا يعادل نحو نصف دورة المبادرة المحورية للأرض Earth's precessional cycle؛ فتحدث التغيرات المدارية كل 22 ألف سنة. والفترة بين الثلاجات الجليدية الحالية مضى عليها أكثر من 11 ألف سنة، وتشير بعض السجلات إلى أننا نعيش في الفترة الدافئة منذ 14 ألف سنة. فهل يعني هذا أن الكتل الجليدية تتقدم في هذه اللحظة؟ الإجابة عن هذا السؤال هي «لا» بكل تأكيد، وذلك لأسباب عدة. فأولاً، المبادرة المحورية ليست العامل المداري Orbital الوحيد الذي يؤثر في المناخ. وتشير السجلات إلى أنه حدثت بين 450 ألف سنة إلى 350 ألف سنة مرحلة بين جليديتين استمرت أكثر بكثير من 11 ألف سنة، وقد توافقت هذه المرحلة مع زمن كان فيه الانحراف المداري Orbital eccentricity في حده الأدنى. وهذا الطراز من الانحراف المداري يجري حالياً؛ مما يوحي أن الفترة بين الجليديتين الحالية قد تستمر آلاف السنين، وربما عشرات الآلاف من السنين، في المستقبل، أو قد تنتهي في أي وقت.

لقد بدأ البليستوسين من تغير مهم في المناخ منذ نحو 2.5 مليون سنة، فالسهول العشبية الواسعة والتندرا في خطوط العرض العالية خلال آخر فترة سابقة للعصر الجليدي من الحقبة الحديثة حلّ محلها نوع آخر من الغطاء هو الجليد. فقد أدى تراكم فائض صغير من الثلج والجليد سنة بعد أخرى إلى تشكل الكتل الجليدية (الثلاجات الجليدية) التي بدأت تزحف ببطءٍ جنوباً. وفي النهاية بدأت الثلاجات الجليدية القارية تندمج بين بعضها ومع الثلاجات الجليدية من الجبال متلاحمةً في اتحاد شرس يمسك الأرض بقبضة من الجليد ضمن شتاء من الثلاجات الجليدية.

لم يكن كوكبنا كله مغطىً بالثلاجات الجليدية كما تتصور العامة في أحيان كثيرة، فلا تزال هناك مناطق مدارية وشعاب مرجانية ومناطق مناخية مشمسة ودافئة ومريحة على مدار السنة. غير أن كل مناطق الأرض تأثرت بالثلاجات الجليدية بشكل أو بآخر؛ فقد تغير المناخ العالمي مؤدياً إلى تغيرات في أنماط الرياح والأمطار. وحتى الأماكن البعيدة عن الجليد كان مناخها قد تغير إلى الأبرد أو إلى الأدفأ، وفي أحيان كثيرة نحو الجفاف. وقد ترامت صحارى وأشباه صحارى باردة عملاقة أمام الصفائح الجليدية الزاحفة، في

حين تعرضت المناطق الجافة عادةً، مثل الصحراء الكبرى في شمال إفريقيا، إلى هطولات غزيرة. بالعكس، فإن غابات الأمطار العظيمة التي تغطي حوض الأمازون وإفريقيا الاستوائية، وهي مناطق استقرار مناخي نسبي خلال عشرات الملايين من السنين قبل بداية العصر الجليدي، تعرضت لبرد وجفاف؛ فتراجعت مساحات الأدغال الواسعة إلى جيوب من الغابات محاطة بمناطق شاسعة من السافانا.

انتشار البشرية

حدث كثير من هذه التغيرات المناخية السريعة فيما كانت البشرية تستعمر الكرة الأرضية. وعلى ما يبدو، فقد وقعت آخر التغيرات التطورية الطارئة على الإنسان التي جعلتنا على ما نحن عليه الآن قبل نحو 35 ألف سنة. ويمكن أن نسمّي هؤلاء البشر الجدد بالحديثين، وهم من احتل العالم شيئاً فشيئاً. فقد وصلوا إلى كل منطقة جديدة بإصرار، ولو ببطء. ولم يحدث هذا خلال قرن واحد، ولم يكن مثل ترويض أمريكا الشمالية من قبل الأوروبيين عندما تحولت خلال بضعة قرون من قارة عملاقة مغطاة بالنباتات الفطرية إلى قارة عملاقة مغطاة بالمحاصيل الزراعية والأسمنت المسلح. وقد كان ذاك الاستعمار بطيئاً، وكانت آلاف السنين تتساقط كالأوراق فيما كان المعاصرون ينتشرون تدريجياً في كل أرجاء الكرة الأرضية. وحتى قارة أستراليا المحاطة بالمحيطات صارت موئلاً للهومو سابينس منذ خمسة وثلاثين ألف سنة. أما آسيا الشمالية؛ فبقيت غير مكتشفة في ذلك الحين. وكانت هناك وراء آسيا مساحات أوسع منها، أمريكا الشمالية والجنوبية، لم تكن قد جربت بعد وقع أقدام الإنسان.

البشر الأوائل الذين وصلوا إلى ما يسمّى الآن سيبيريا هم صيادو الحيوانات الضخمة من العصر الحجري. وقد وصلوا إلى هناك قبل ثلاثين ألف سنة، وكانت لديهم تقاليد خاصة بهم في هذا المناخ القاسي؛ فالأدوات الحجرية من سيبيريا الشرقية تُشاهَد فيها بعض الاختلافات عن التقاليد الاصطناعية الأوروبية في ذلك الوقت، وكانت متأثرة بوضوح بثقافات الرقائق الحجرية من جنوب شرق آسيا. ولكن التكنولوجيا الكبرى، وهي صناعة رؤوس الحراب الكبيرة، كانت مخصصة لصيد الحيوانات الضخمة.

وتزامن وصول البشر الأوائل إلى سيبيريا مع وقت ارتفاع طفيف في درجات الحرارة، وهذه المدة الدافئة نسبياً، التي تبعها وقت أبرد، ربما شجعت على انتشار الناس إلى

تلك المنطقة الموحشة. وبُعيد وصولهم إلى سيبيريا بدأت الأرض تتبرد مرة أخرى، وقبل نحو خمسة وعشرين ألف سنة كانت الأرض تمر بحادث جليدي كبير.

وفي أوروبا الغربية وأمريكا الشمالية كانت الصفائح الجليدية القارية العظيمة تزحف بعناد نحو الجنوب فتغطي مساحاتٍ شاسعةً بجليد تصل ثخانته إلى ميل واحد. ولكن في سيبيريا كانت الرطوبة منخفضة لدرجة لم تسمح بتشكل الجليد؛ فانتشر الناس نحو هذه الأراضي الشاسعة الخالية من الأشجار باتجاه الشرق. وبسبب قلة الأخشاب أصبحت جلود وقرون فرائسهم موارد مهمة، بل إنهم استخدموا العظام من أكبر طرائدهم، -الماستودون والماموث-، في بناء المساكن. وتحول هؤلاء الناس -مكرهين- إلى صيادي الحيوانات الضخمة، ويحتمل أن فرائسهم الرئيسة كانت الماموث والماستودون.

وبينما اجتاز الناس آسيا واستقروا في بيرينغيا على موجات صغيرة يفترض أنها حدثت ما بين ثلاثين واثني عشر ألف سنة، توسعت صفائح الجليد القاري التي كانت تغطي أجزاءً كبيرة من أمريكا الشمالية إلى حجمها الأعظمي من خلال سلسلة طويلة من عوارض التبريد تخللتها عوارض احترار سريع. وبزيادة حجم الجليد بدأ مستوى المحيط بالانخفاض مؤدياً إلى انكشاف مساحات واسعة كانت مغمورة بمياه البحر لتصبح يابسة جافة، وشكلت هذه اليابسة في بعض المناطق معابر للهجرة بين ما كان سابقاً جزراً معزولة وبين القارات. ولكن، عندما بدأ الجليد بالذوبان أخيراً بدأ مستوى البحر بالارتفاع مرة أخرى. وقبل نحو أربعة عشر ألف سنة كانت الثلاجات الجليدية القارية التي غطت أغلب كندا ومناطق شاسعة مما صار في عصرنا الولايات المتحدة تذوب ببطء نتيجة الزيادة التدريجية في درجات الحرارة.

ولكن، بعد هذا بقليل، قادت حادثة جديدة إلى تسارع عملية الذوبان. فعندما ذاب ما يكفي من الجليد بحيث لم تعد الثلاجات الجليدية تمتد من الساحل إلى البحر، صارت ولادة الكتل الجليدية غير ممكنة على طول السواحل الشرقية والغربية لما صار الآن اسمه كندا والأجزاء الشمالية من الولايات المتحدة. ففي كل ربيع من أزمنة ذرا الثلاجات الجليدية (بين نحو ثمانية عشر ألف سنة وأربعة عشر ألف سنة مضت) كانت تنطلق أساطيل عظيمة من الجبال الجليدية إلى المحيطات قرب الشواطئ، وهذا كان من شأنه المحافظة على برودة المياه وخلق رياح باردة جداً كانت تبرّد اليابسة أيضاً. ومع توقف تشكل الجبال الجليدية ظهرت رياح شاطئية أكثر دفئاً، فإن الجليد بدأ يذوب أسرع في كل المواقع على القارات.

وكانت مناطق الجبهات الذائبة من الكتل الجليدية أماكن قاسية على نحو غير عادي بامتياز فتميزت الجدران الجليدية المتقهقرة برياح قوية لا تتوقف. وكانت هذه الرياح قوية لدرجة أنها خلقت تراكمات ضخمة من الرمل والطمي، وتسمّى الرسوبيات الطفالية [أو الطمي] Loess. وحملت الرياح كذلك البذور، ولهذا استعمرت التربة المزاحة أمام الثلاجات الجليدية بالنباتات الرائدة. وأتت السراخس Ferns أولاً ثم النباتات الأكثر تعقيداً. وشكّل الصفصاف Willow والعرعر Juniper والحور Poplar والعديد من الشجيرات أول مجتمع مستقر يحلّ محل نظام الثلاجات الجليدية؛ وبعد ذلك بقليل تتابعت مجتمعات نباتية أخرى حسب الموقع. ففي الغرب ذي المناخ الأكثر اعتدالاً كانت الغابات المنخفضة التي تغلب فيها شجرة الراتنج (التنوب) Spruce هي السائدة؛ وفي الأجزاء الداخلية من القارة كانت السهول الجرداء (التندرا Tundra) والتربة الصقيعية هي السائدة. ولكن الكتل الجليدية كانت تتقهقر في كل مكان، ومع هجرتها، أو بالأحرى ذوبانها وتراجعها نحو الشمال، كانت السهول الجرداء تحلّ محلها، والتندرا تتبعها بعد وقت قريب الغابات الراتنجية.

كانت مجتمعات الراتنج (التنوب) في أمريكا الشمالية غابات مفتوحة بقدر ما كانت غابات كثيفة، وأدغال من الغابات تتخلل رقعاً من المروج والشجيرات، ولم تكن تشبه بأي حال تلك المجتمعات القليلة المتبقية من تنوب دوغلاس ضمن الغابات القديمة من الشمال الغربي، وتلك المناطق يجعل فيها النمو الكثيف للشجيرات وتراكم جذوع الأشجار المتفسخة مرور الحيوانات الكبرى والإنسان صعباً جداً.

وإلى الجنوب من ثلاجات جليدية أمريكا الشمالية كان هناك العديد من الموائل المتنوعة طوال العصر الجليدي؛ فكانت هناك غابات التندرا والمروج والصحارى ونباتات كافية لدعم قطعان هائلة من الثدييات العملاقة. ومع انتهاء العصر الجليدي وانحسار البرد عن أجزاء كبيرة من العالم بدأت مجتمعات الناس تتزايد بشكل ملموس.

وقبل عشرة آلاف سنة نجح الناس في استعمار جميع القارات ما عدا القارة القطبية الجنوبية، ونجم عن التلاؤم مع كل هذه المواقع المتنوعة ما نسمّيه الآن أعراق البشر المختلفة. وبينما كان يعتقد لوقت طويل أن اختلاف الملامح الجلية للعيان مثل لون الجلد كان بالدرجة الأولى تكيفاً مع اختلاف كمية أشعة الشمس، فإن الدراسات التي أجريت مؤخراً تشير إلى أن كثيرا مما نسمّيه السمات «العرقية»

ربما كانت تكيفات ناجمة عن الانتخاب الجنسي Sexual selection أكثر من كونها زيادة اللياقة في شتى البيئات. ولكن، حدث أيضاً كثير من التلاؤمات الأخرى، أغلبها غير مرئي لعلماء المورفولوجيا.

تشتهر إفريقيا بكثرة الثدييات الضخمة، فلن تجد في أي مكان آخر من الأرض مثل هذا التنوع من الحيوانات العاشبة واللاحمة الكبيرة. فهذه الجنة الحيوانية لم تكن استثنائية يوماً ما، بل كانت هي القاعدة: فالمراعي في كل أقاليم الأرض ذات المناخ المعتدل والمداري كانت منذ زمن قريب ذات نكهة إفريقية. ولكن، مثل تلك القوى التي محت الفيلة في كارو، أدى حدثٌ استثنائيٌ إلى نضوب التنوع الحيوي للثدييات الكبيرة خلال آخر خمسين ألف سنة.

ومع أن اختفاء الحيوانات الكبرى يشكل تحدياً هائلاً لمن يدرسون الانقراض، فالدرس المهم من الماضي هو أن انقراض الحيوانات الكبرى له تأثير أكبر بكثير في بنية النظم الإيكولوجية من انقراض الحيوانات الأصغر. فالانقراض في آخر الطباشيري كان مهما ليس بسبب انقراض كثير من الثدييات الصغيرة بل بسبب انقراض الديناصورات الكبيرة جداً.

وزوال الديناصورات البرية الكبرى هو الذي أدى إلى إعادة تكوين البيئات البرية. وبالمثل، فإن زوال أغلبية أنواع الثدييات الكبرى في معظم أنحاء العالم خلال الخمسين ألف سنة الأخيرة كان حدثاً لم نبدأ بإدراك أهميته إلا مؤخراً، وله تأثيرات طويلة الأمد ستبقى لملايين السنين في المستقبل.

ومن الفترات المميزة كانت فترة البليستوسين المتأخر منذ نحو خمس عشرة إلى اثني عشر ألف سنة حين انقرضت نسبة كبيرة من الثدييات الكبيرة في أمريكا الشمالية، إذ انقرض خمسة وثلاثون جنساً منها على الأقل (ومن ثمّ على الأقل خمسة وثلاثون نوعاً). وستة منها كانت تعيش في أماكن أخرى أيضاً (مثل الحصان الذي انقرض في أمريكا الشمالية والجنوبية لكنه لم ينقرض في العالم القديم). أما الأغلبية الساحقة؛ فانقرضت تماماً. وفي الواقع، كان أغلبها ينتمي إلى طيف واسع من المجموعات التصنيفية متوزعةً بين إحدى وعشرين عائلة وسبع رتب. الصفة المشتركة الوحيدة بين هذه المجموعة المتنوعة إلى حدّ بعيد هي أن أغلبها (حتى وإن ليس جميعها بالتأكيد) كانت من الحيوانات الكبيرة.

وكانت أشهر هذه الحيوانات وأكثرها رمزيةً الحيوانات الشبيهة بالفيلة من رتبة الخرطوميات، بما فيها الماستودون والغومفوتيريوم فضلاً عن الماموث، وهي من أقرب أقرباء فيلة العالم القديم التي لا تزال موجودة. وكان الماستودون الأمريكي الأكثر انتشاراً في أمريكا الشمالية من هذه الحيوانات، حيث كان شائعاً من الساحل إلى الساحل في كل أجزاء القارة غير المغطاة بالثلاجات الجليدية. وكانت أعداده أكثر في الغابات الكثيفة وقليلة الكثافة في الجزء الشرقي من القارة، حيث كانت تتغذى بأوراق الأشجار والشجيرات، ولا سيما التنّوب. وكانت الغومفوتيريات مجموعة عجيبة لا تشبه أي حيوانات موجودة حاليا، وتوجد لها أحافير مشكوك فيها من فلوريدا، إلا أنها كانت تنتشر انتشاراً واسعاً في أمريكا الجنوبية لا الشمالية. والمجموعة الأخيرة، وهي الفيلة، كانت ممثلة في أمريكا الشمالية بالماموث الذي كان يوجد منه نوعان هما: الماموث الكولومبي، والماموث الصوفي.

والمجموعة الأخرى من الحيوانات العاشبة الضخمة من رموز العصر الجليدي في أمريكا الشمالية هي الكسلانيات Sloths الأرضية العملاقة وأقرباؤها المدرعات Armadillos. وانقرضت سبعة أجناس مؤلّفة لهذه المجموعة في أمريكا الشمالية ولم يبق منها إلا المدرع الشائع في الجنوب الغربي الأمريكي. وكانت الكسلانيات الأرضية أكبر الحيوانات حجماً في هذه المجموعة، وتراوح حجمها من حجم الدب الأسود إلى حجم الماموث. وكثيراً ما يصادَف النوع ذو الحجم المتوسط في حُفَر القطران في لوس أنجلوس المعاصرة، وهذا الأخير، كسلان شاستا الأرضي Shasta ground sloth، هو الأشهر، وكان بحجم دب كبير أو فيل صغير. والغليبتودون الأمريكي حيوان مذهل آخر كان طوله يصل إلى عشر أقدام وله درع قوية تشبه درع السلحفاة. وكذلك انقرضت المدرعات ولم يبق من هذا الجنس على قيد الحياة إلا نوع واحد هو المدرع ذو الخطوط التسعة الشائع Common nine-banded armadillo.

كما انقرضت الحيوانات من مزدوجات الأصابع ومفردات الأصابع أيضاً. ومن بين مفردات الأصابع انقرض الحصان الذي كان منه عشرة أنواع منفصلة على الأقل، إضافة إلى نوعين من التابير. وكانت الخسائر جسيمة أكثر بين مزدوجات الأصابع، فانقرضت ثلاثة عشر نوعاً من خمس عائلات في أمريكا الشمالية وحدها خلال انقراض البليستوسين بما في ذلك: جنسان من البيكاري (الخنازير البرية)، وجمل ونوعان من اللاما والأيل الجبلي Moutain deer، والإلكة الموظية Elk-moose،

وثلاثة أنواع من الظباء الأمريكية، والسايغا Saiga، وثور الشجيرات Shurb-ox، وثور المسك الذي وصفه هارلان Harlan's muskox.

وبانقراض كل هذه الحيوانات العاشبة، فلا غرابة في أن كثيراً من اللواحم انقرضت أيضاً ومنها: الفهد الأمريكي American Cheetah، والسنوريات الكبيرة المعروفة بالقطط ذات الأسنان السيفية، والنمر ذو الأسنان السيفية Saber-toothed tiger، والدب العملاق قصير الوجه، ودب الكهوف الفلوريدي، ونوعان من الظربان، ونوع من الكلاب. ومن الحيوانات الصغيرة في هذه القائمة ثلاثة أجناس من القوارض والقندس العملاق، إلا أن هذه كانت استثناءات من القاعدة، فأغلب الحيوانات المنقرضة كانت ضخمة الحجم.

وتزامن الانقراض في أمريكا الشمالية مع تغير مفاجئ في تركيب المجتمعات النباتية، إذ تغيرت مناطق واسعة في نصف الكرة الشمالي من تجمعات نباتية تسودها الأشجار المغذية، مثل الصفصاف والحور والبتولا، إلى تجمعات فقيرة بالمواد الغذائية يسودها التنّوب والنغت Alder. وحتى في هذه المناطق التي يسودها التنّوب (وهو شجرة فقيرة بالمواد الغذائية) بقيت هناك تجمعات متنوعة من نباتات ذات قيمة غذائية أعلى. ومع تناقص أعداد النباتات المغذية نتيجة تغير المناخ صارت الثدييات العاشبة تتغذى بالأشجار المتبقية، مساهمةً بذلك في زوالها ومؤدية إلى تقلص أعداد كثير من أنواع الثدييات المعتمدة على النباتات في قوتها. وبنهاية البليستوسين، فإن غابات التنّوب المفتوحة والمتنوعة نسبياً وتجمعات الأعشاب المغذية حل محلها بسرعة غابات أكثر كثافةً ذات تنوع أقل وقيمة غذائية أقل. ففي الأجزاء الشرقية من أمريكا الشمالية تغيرت غيضات التنّوب إلى غابات ضخمة من أشجار بطيئة النمو مثل البلوط وجوز الكاريا Hickory والصنوبر الجنوبي Southern pine، في حين أنه في الشمال الغربي على ساحل المحيط الهادي بدأت غابات عظيمة من تنّوب دوغلاس Douglas fir تغطي الأرض. وقدرة مثل هذه الأنواع من الغابات الاستيعابية للثدييات الضخمة أقل بكثير مقارنةً بالنباتات البليستوسينية التي سبقتها.

لم تكن أمريكا الشمالية هي الوحيدة التي عانت الخسائر الفادحة.[10] فقد كانت أمريكا الشمالية وأمريكا الجنوبية منفصلتين إحداهما عن الأخرى، ومن ثم تميز حيوانات كل منهما بتواريخ تطورية منفصلة تماماً حتى تشكل برزخ بنما قبل نحو 2.5 مليون سنة. وقد تطورت ثدييات كبيرة مميزة عديدة في أمريكا الجنوبية،

بما فيها: الغليبتودونات الهائلة الشبيهة بالمدرعات، إضافة إلى الكسلانيات العملاقة (وكلاهما هاجر شمالاً فيما بعد وانتشر في أمريكا الشمالية)، والخنازير العملاقة، واللاما، والقوارض الضخمة، وبعض الجرابيات العجيبة. وعندما تشكل الجسر البري بدأ التبادل بين القارتين.

وكما هي الحال في أمريكا الشمالية، حدث انقراض الحيوانات الكبيرة بين ثدييات أمريكا الجنوبية بعد انتهاء العصر الجليدي بقليل، إذ انقرض 46 جنساً قبل ما بين خمس عشرة واثني عشر ألف سنة مضت. ومن حيث نسبة الحيوانات المنقرض، فقد ترك الانقراض الجماعي في أمريكا الجنوبية خراباً أكثر حتى من أمريكا الشمالية.

لقد عانت أستراليا خسائر أعظم، لكن ذلك كان في وقت أبكر من أمريكا الشمالية والجنوبية. فقد كانت القارة الأسترالية معزولة عن غيرها بالمحيطات منذ عصر الديناصورات، ومن ثم كانت مقطوعة عن الخط الرئيس لتطور ثدييات الحقبة الحديثة. ومضت ثدييات أستراليا في مسار تطوري خاص بها أعطى تنوعاً هائلاً من الجرابيات، وكان كثير منها كبير الحجم.

قضى في الانقراض الجماعي للحيوانات الأسترالي خلال الخمسين ألف سنة الماضية خمسة وأربعون نوعاً من الجرابيات تنتمي إلى ثلاثة عشر جنساً. ولم يبق على قيد الحياة إلا أربعة من أصل تسعة وأربعين نوعاً من الجرابيات الكبيرة، أي التي وزنها أكثر من عشرين رطلاً [9 كغم]، الموجودة في هذه القارة منذ مئة ألف سنة. ولم تدعم أي أنواع وافدة من القارات الأخرى الحيوانات الأسترالي المتضرر. وبين الضحايا دببة الكوالا العملاقة وعدة أنواع من الحيوانات العاشبة بحجم فرس النهر المُسماة ديبروتودون *Diprotodon* وعدد من أنواع الكنغر العملاق والومبت Wombats العملاق ومجموعة من الجرابيات الشبيهة بالأيل. كما انقرضت آكلات اللحوم (وكلها من الجرابيات) بما في ذلك كائن ضخم شبيه بالأسد وآخر شبيه بالكلب. وفي الأزمنة الحديثة اختفى حيوان مفترس آخر شبيه بالقط كان يعيش على الجزر البحرية. واختفت الزواحف الضخمة أيضاً، بما فيها الورل العملاق وسلحفاة برية عملاقة وحية عملاقة إضافة إلى عدد من أنواع الطيور الضخمة غير القادرة على الطيران، وغيرها كثير. فالكائنات الضخمة التي نجت من الانقراض كانت تلك القادرة على الركض السريع أو تلك التي كانت حياتها ليلية، كما لاحظ صديقنا الأسترالي العظيم تيم فلانري.

وتتزامن موجة الانقراضات التي أثرت في الحيوانات في أستراليا وأمريكا الشمالية وأمريكا الجنوبية مع الظهور الأول للبشر في الأقاليم الثلاثة ومع تغير ملموس في المناخ. وتشير الأدلة الموثوق بها الآن إلى أن الناس وصلوا إلى أستراليا قبل ما بين خمسة وثلاثين وخمسين ألف سنة. وأغلب الثدييات الأسترالية الضخمة انقرضت قبل ما بين نحو ثلاثين وعشرين ألف سنة.

ويتبين نمط آخر في المناطق التي كان للبشر فيها تاريخ قديم، مثل إفريقيا وآسيا وأوروبا. فقد حدث في إفريقيا انقراض متواضع للثدييات قبل 2.5 مليون سنة، لكن الخسائر اللاحقة كانت أقل سوءاً مقارنةً بالأقاليم الأخرى. ولحق التدهور بثدييات إفريقيا الشمالية تحديداً نتيجة التغيرات المناخية التي أدت إلى تشكل الصحراء الكبرى. وكانت الانقراضات في إفريقيا الشرقية قليلة، ولكن في إفريقيا الجنوبية ترافقت التغيرات المناخية الجسيمة التي حدثت في الفترة قبل ما بين نحو اثني عشر ألف سنة وتسعة آلاف سنة مع انقراض ستة أنواع من الثدييات الكبيرة. وفي أوروبا وآسيا كانت الانقراضات أيضاً أقل من الأمريكتين وأستراليا؛ وكانت أهم الضحايا هي العمالقة مثل الماستودون والماموث ووحيد القرن الصوفي.

وهكذا، يمكن تلخيص الانقراض كما يلي:

- طالت الانقراضات بالدرجة الأولى الحيوانات البرية الضخمة: فالحيوانات الأصغر حجماً وجميع الحيوانات البحرية عملياً نجت من الانقراض.
- نجت الثدييات الكبيرة في إفريقيا أفضل من الأقاليم الأخرى. وقد بلغت خسارة أجناس الثدييات الكبيرة في أمريكا الشمالية 73 في المئة؛ وفي أمريكا الجنوبية 79 في المئة؛ وفي أستراليا 86 في المئة؛ أما في إفريقيا فلم ينقرض سوى نحو 14 في المئة خلال المئة ألف سنة الماضية.
- كانت الانقراضات مفاجئة في كل واحد من الأقاليم الكبرى من اليابسة، لكنها وقعت في أوقات مختلفة في قارات مختلفة. وتعطي طرق التأريخ بالكربون المشع في الحاضر قدرة عالية للتمييز الزمني، وقد بينت هذه الطرق أن بعض أنواع الثدييات الكبيرة انقرضت تماماً في ظرف ثلاثمئة سنة أو أقل.
- لم تكن الانقراضات نتيجة اجتياح مجموعات جديدة من الحيوانات (عدا

الإنسان). فقد كان يُعتقَد في السابق أن كثيراً من الانقراضات وقع عندما اجتاحت كائنات جديدة أكثر تطوراً أو تلاؤماً البيئات الجديدة فجأة. فالأمر لم يكن كذلك في انقراضات العصر الجليدي، إذ لم يتأكد ارتباط بين وفود حيوانات جديد ما على إقليم ما مع انقراض الحيوانات القاطنة فيه.

أوحت هذه المجموعات من الأدلة لكثير من العلماء أن البشرية هي التي حرضت هذا الانقراض الجماعي، ويجادل غيرهم في الحماس ذاته فيما كان سبباً لانقراض الثدييات الضخمة، فيقولون إنه التغير في أنماط الموارد والغطاء النباتي الذي حدث خلال التغيرات المناخية الشديدة المرافقة لنهاية العصر الجليدي البليستوسيني. ويقتصر أغلب النقاش حول هذا الانقراض على الجدال حول السبب، ويسمّى المعسكران الرئيسان بمعسكر القتل الجائر Overkill (الصيد البشري) ومعسكر تغير المناخ Climate Change.

ومهما كان السبب، فقد حدثت إعادة تنظيم كبرى للنظم الإيكولوجية البرية في القارات كلها عدا إفريقيا. وإفريقيا اليوم تخسر ثديياتها الضخمة مع حصر قطعان هائلة منها ضمن محميات وحدائق وطنية، حيث تكون فريسة سهلة للصيد غير المشروع ضمن موائلها المحصورة حديثاً.

إن نهاية الحيوانات الضخم ليست نقطة زمنية محددة بدقة. ولكن، عندما ننظر إليها من الوقت الحالي نجدها حدثت منذ لحظة. فالفترات الزمنية التي تدوم عشرة آلاف سنة لا يُعتدُّ بها، وقد تقع خارج مجال قدرة تمييز التكنولوجيا المتاحة لنا عندما ننظر إليها من مسافة زمنية تبلغ عشرات إلى مئات الملايين من السنين. ونهاية عصر الثدييات الضخمة تبدو مديدة من وجهة نظرنا الحالية، لكنها ستبدو مفاجئة وفورية أكثر فأكثر كلما اختفت في الماضي، وهذا من الصفات العجيبة للزمن.

وتمثل الثديياتُ الضخمة التي لا تزال موجودة على الأرض غالبيةَ الأنواع المهددة بالانقراض، وأعداد أكثر من أنواع الثدييات الضخمة تكون مهددة بالانقراض اليوم. وإذا كان الطور الأول من الانقراض الجماعي المعاصر هو خسارة الثدييات الضخمة، فإن طوره الحالي يبدو متركزاً على النباتات والطيور والحشرات مع تحول الغابات العريقة إلى حقول ومدن.

20

ما يمكن معرفته عن مستقبل الحياة على الأرض

المستقبل زمن لا نصل إليه أبداً، إنه الطُعْم السريع لكلاب الصيد السلوقية. فإذا كانت هناك أي عبرة في تاريخ الحياة، فهي أن المصادفة كانت واحداً من أهم لاعبين اثنين في لعبة الحياة، واللاعب الآخر هو التطور، وتجعل المصادفة جميع محاولات التكهن بالأحداث والنزعات في تاريخ الحياة في المستقبل عملاً محفوفاً بالمخاطر. ولكن المختصّ بعلم الكواكب والكاتب اللامع دون براونلي Don Brownlee، من جامعة واشنطن، وجد حلاً لهذا الغموض الظاهري للمستقبل. ويدعي براونلي أنّ هناك مستقبلاً «قابلا للمعرفة»، والمفارقة في أن الأحداث تكون أكثر قابلية للمعرفة كلما كانت أبعد في المستقبل. وفي هذا الموضوع كان براونلي يتحدث عن التغيرات الفيزيائية في صفات كوكبنا وشمسنا التي يمكن التنبؤ بها. ومن الأمثلة على المستقبل القابل للمعرفة الذي يمكن التنبؤ به بدقة كافية التاريخ المستقبلي لشمسنا التي نعرف عنها أنها ستتحول إلى عملاق أحمر قطره أكبر من مدار الأرض، وربما أكبر من مدار المريخ (ومن ثم، ستبتلع الأرض وربما المريخ أيضاً) في غضون 7.5 بليون سنة، مع احتمال زيادة أو نقصان قدره ربع بليون سنة.

لقد حسّنت دراسة التطور البيولوجي على الأرض فهمَ العلماء للماضي السحيق، وهذا أيضاً من شأنه أن يعطي تلميحاتٍ لفهم المستقبل. ومن مميزات الماضي أن التاريخ التطوري تأثر بقوة ليس بتفاعل الحياة فحسب (التنافس والافتراس) بل كذلك بسير التطور الفيزيائي للأرض وغلافها الجوي ومحيطاتها. وبينما لا يزال هناك كثير من الأحداث التي تمليها المصادفة، مثل كثرة اصطدامات الكويكبات بالأرض وتوقيتها، فإننا نستطيع أن نتكهن تكهنات دقيقة إلى حدّ بعيد حول التغيرات القابلة للتنبؤ في درجات الحرارة الأرضية والتركيب الكيميائي للغلاف الجوي والمحيطات والأحداث الجيوفيزيائية الكبرى التي ستحدث لا محالة خلال ما تبقّى للأرض من عمر.

يرتكز مفهوم الكوكب القابل للسكنى على تنشئة الكوكب، والحياة هي النتيجة النهائية لتشكل الكوكب وتغيُّره. فقد تناولنا في الفصول السابقة أهم نظم تجدد العناصر التي تعيد تدوير العناصر المغذية الأكثر أهمية وتحافظ على درجات حرارة العالم شبه ثابتة؛ ويمكن معرفة التغيرات في هذه النظم (أو توقف التغيرات فيها)، مثل سرعة تمدد

الشمس. وأهم هذه الدورات بالنسبة إلى الحياة هي حركة وتحول عناصر الكربون والنيتروجين والكبريت والفوسفور وشتى العناصر النزرة Trace elements. وتأتي مصادر الطاقة لشتى هذه النظم من مصدرين بالدرجة الأولى هما: الشمس، والحرارة المتولدة من تفكك المواد المشعة في باطن الأرض؛ والشمس أهم هذين المصدرين بسبب أهميتها للحياة بصفتها مصدراً للطاقة من خلال البناء الضوئي.

الشمس مفاعل نووي جبّار، إلا أن استقراره موضع جدل. فمع تطور الشمس يتناقص عدد الجسيمات في نواتها خلال اندماج ذرات الهيدروجين لتشكل ذرات الهليوم، لكن المفارقة هي في أن تناقص عدد الذرات في نواة الشمس يترافق بزيادة إنتاج الطاقة (كالضوء والحرارة)، وهذه الزيادة بطيئة لكنها مستمرة.

وتشترك جميع النجوم الشبيهة بالشمس بهذه الخاصية. فقد ازداد سطوع الشمس نحو ثلاثين في المئة خلال آخر 4.5 بليون سنة من عمرها. إن زيادة السطوع تزيد شدة نور الشمس الذي يضيء الكواكب، واستمرار هذا التغير سيؤدي إلى خسارة المحيطات وخلق ظروف جهنمية تشبه تلك الموجودة على كوكب الزهرة. (المحيطات لن تغلي حتى تتبخر كما يظهر في بعض التصويرات المبهرجة لمستقبل الأرض، إنما سيُنْزع الهيدروجين من جزيئات الماء في المحيطات واحدة واحدة؛ فيصعد الهيدروجين إلى الطبقات العليا من الجو، ويبقى الأكسجين في الأسفل.)

بقيت الأرض طوال تاريخها ضمن «النطاق المعتدل» Temperate zone من المجموعة الشمسية؛ أي إن الأرض بقيت في المجال «الصحيح» للمسافات عن الشمس لتسمح درجات الحرارة على سطحها بوجود المحيطات والحيوانات دون أن تتجمد أو تُشوى. ويمتد هذا النطاق القابل للسكن (بمثابة الجغرافيا الفضائية) بين حدّ معروف جيداً داخل مدار الأرض مباشرة وحدٍّ آخر غير معروف تماماً قرب المريخ وربما أبعد منه بقليل. ويتحرك النطاق القابل للسكن إلى الخارج مع زيادة سطوع الشمس، وفي المستقبل سيتجاوز النطاق الأرض ويتركها وراءه. وستتحول الأرض في الواقع إلى ما هو كوكب الزهرة اليوم. والحدّ الداخلي للنطاق القابل للعيش *Habitable zone* لا يبعد عن الأرض إلا 9.3 مليون ميل [15 مليون كيلومتر]، وسيصل إلى الأرض خلال نصف بليون إلى بليون سنة من الآن (وربما أسرع من ذلك). وبعد ذلك الوقت سيكون سطوع الشمس أشدّ مما يمكن أن تتحمله الكائنات القاطنة على الأرض.

ومن المفترض أن يكون التزايد الثابت في الطاقة التي تصل إلى الأرض من الشمس خلال 4.567 بليون سنة الماضية قد قضى على الحياة على الأرض منذ مدة زمنية بعيدة، كما حدث على كوكب الزهرة (لو افترضنا أن الزهرة كان عليها حياة أساساً)، لولا أهم نظام بين جميع نظم دعم الحياة الكوكبية، وهو منظم الحرارة العالمي الموصوف في الفصل الثاني. لقد حافظ هذا النظام طوال أكثر من ثلاثة بلايين سنة (وربما أربعة بلايين سنة) على درجة حرارة العالم المتوسطة بين نقطتي التجمد والغليان للماء (باستثناء الحدث العارض لأرض كرة الثلج)، ومن ثم سمح باستمرار وجود أهم أحد متطلبات الحياة، وهو «الماء السائل»، على سطح الأرض طوال هذه الفترة الزمنية الفائقة. ولا تقلّ أهمية عن هذا أن الحياة التي تطورت ضمن حدود حرارية ضيقة استطاعت أن تحافظ على الفيسيولوجيا والتفاعلات الكيميائية الداخلية المعتمدة على الحرارة لتبقى متماثلة في الأساس. وزيادة درجات الحرارة بسبب الشمس وزيادة الانخفاض في ثاني أكسيد الكربون في الجو هما العمليتان اللتان سيكون لهما التأثير الأعظم في تطور الحياة بالمستقبل.

لقد كان صعود تراكيز ثاني أكسيد الكربون وهبوطها خلال آخر 500 مليون سنة، أي خلال زمن الحيوانات، موثقاً جيداً إلى حدّ بعيد. ومن البديهي أن عنصر الأكسجين الضروري لجميع الحيوانات عنصر مهم أيضاً. وقد تحدثنا عن تغير مستويات هذين الغازين من الماضي إلى الحاضر، إلا أن المسار المستقبلي لكلا الغازين قابل للمعرفة ومن ثم قابل للتنبؤ، كما هي الحال مع علمنا عن سرعة تمدد الشمس وزيادة طاقتها.

والتنبؤ طويل الأمد حول ثاني أكسيد الكربون هو أن النزعة المشاهدة في تراكيزه خلال آخر بليون سنة على الأقلّ سوف تستمرّ، أي إنه سيتابع انخفاضه الحتمي، حتى ولو أنه بطيء. ويعود انخفاض التراكيز على حدّ سواء إلى تأثير الحياة وتكتونيات الصفائح: فمع ازدياد استعمال ثاني أكسيد الكربون لصناعة هياكل الكائنات، ولا سيما في المحيطات، يتم استهلاك ثاني أكسيد الكربون. وإذا بقيت هذه الهياكل في المحيطات، فستجري إعادة تدوير ثاني أكسيد الكربون المحبوس في الهياكل (على شكل كربونات الكالسيوم). ولكن تكتونيات الصفائح تؤدي إلى تزايد حجم القارات؛ فتحبس كميات متزايدة من حجر الجير، وهو مقبرة ثاني أكسيد الكربون الجوي، في القارات على شكل صخور رسوبية.

قد يخطر على البال أن النزعة طويلة الأمد لانخفاض ثاني أكسيد الكربون ستؤدي إلى ظروف أرض كرة الثلج بلا رجعة. ولكن التبريد الناجم عن انخفاض تركيز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي لن يكون الميزة الأساسية للأرض المتشيخة، إنما الميزة الأساسية ستكون التسخين. فزيادة الحرارة من الشمس ستطغى في النهاية على التأثيرات التبريدية لنقص ثاني أكسيد الكربون وتأثير الدفيئة المرافق له. وعندما تصل درجات حرارة العالم المتوسطة إلى ما بين 120 إلى 140 درجة فهرنهايت (أي 50 إلى 60 درجة سيليزية) ستبدأ الأرض بخسارة محيطاتها إلى الفضاء.

وقبل خسارة المحيطات خلال بليونين إلى ثلاثة بلايين سنة من الآن بوقت طويل ستنقرض الحياة على سطح الأرض؛ لأن الكائنات التي تقوم بالبناء الضوئي، من ميكروبات إلى نباتات راقية، لن تستطيع أن تبقى على قيد الحياة في جو ذي محتوى منخفض من ثاني أكسيد الكربون. وسيؤدي نفاد هذا المصدر للكربون عندها إلى انخفاض جديد في صلاحية الأرض للسكن؛ لأن الانخفاض في ثاني أكسيد الكربون سيطلق انخفاضاً في تركيز الأكسجين الجوي إلى مستوىً لا يكفي لدعم الحياة الحيوانية.

وهذه العملية يمكن مشاهدتها بالفعل. فعندما استعمرت النباتات الوعائية سطح الأرض لأول مرة منذ نحو 475 مليون سنة، جرى هذا الاستعمار في جو غني بثاني أكسيد الكربون. ولم تكن هناك حاجة إلى حفظ الكربون في العمليات الفيسيولوجية. وحتى يومنا هذا يحتاج كثير من الأنواع النباتية إلى ما لا يقلّ عن 150 جزءاً في المليون من ثاني أكسيد الكربون. وأشار جيمس كاستينغ في مقالة نشرها سنة 1997 إلى أن هناك مجموعة ثانية كبيرة من النباتات، بما في ذلك العديد من الأنواع العشبية الشائعة في خطوط العرض الوسطى لكوكبنا، تستخدم شكلاً من البناء الضوئي مختلفاً اختلافاً كبيراً لتعيش في ظروف تراكيز أقلّ من ثاني أكسيد الكربون تصل أحياناً إلى 10 أجزاء في المليون، وهي نباتات C_4 الموصوفة في فصلٍ سابق. وستبقى هذه النباتات موجودة لفترة أطول من أولاد عمها المدمنين على ثاني أكسيد الكربون، فتساهم بذلك في تمديد ملموس لحياة الغلاف الحيوي (البيوسفير) حتى في عالمٍ هبطت مستويات ثاني أكسيد الكربون فيه إلى أقلّ بكثير من المستويات الراهنة.

ونستطيع أن نتنبأ بسلامة بأن التطور المستقبلي للنباتات سيكون نحو ظهور نباتات تعيش في مستويات أقلّ من ثاني أكسيد الكربون مقارنةً بأسلافها نباتات C3. وكذلك، ولما كانت درجات حرارة العالم ستشهد ارتفاعاً، فسيكون حفظ الماء ضمن النبات مشكلة

متزايدة الحدّة. وسيكون لدى النباتات احتياجان متعارضان هما: تكبير المسامات في أوراقها للسماح لثاني أكسيد الكربون الذي صارت كميته في الجو منخفضة بالوصول إلى داخلها، وفي الوقت نفسه محاولة التقليل من خسارة الماء عبر المسامات نفسها. وعلى أقلّ تقدير، يمكن أن نتوقع في المستقبل نباتات تتألف من نباتات صبورة قاسية مشمعة تغلق كل المنافذ إلى العالم الخارجي عندما لا يكون هناك ضوء للقيام بالبناء الضوئي.

وبظهور نباتات جديدة ذات غلاف خارجي أكثر قساوة من المتوقع أن تختفي الأوراق، على الأقلّ بشكلها الحالي. وسيحدث الشيء نفسه للأعشاب، فخسارة الماء من النباتات التي تكون فيها نسبة المساحة إلى الحجم عالية نسبياً تحتم الموت على أوراق الأعشاب والنباتات الأخرى ذات الأوراق الرقيقة. وكل هذا سيتطلب بكل تأكيد حدوث تغيير على الحياة الحيوانية.

بعد وقت قد يكون قصيراً، أي نحو 500 مليون سنة من الآن، أو طويلاً، أي نحو بليون سنة في المستقبل، سيصل مستوى ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي إلى مستويات لا تسمح ببقاء الحياة النباتية المعتادة لنا. ولن يكون التحول بادئ الأمر مفاجئاً أبداً: النباتات في كل أنحاء العالم ستموت ببطء. ولكن كوكبنا لن يتحول إلى كوكب بنيّ فوراً، فكلما انقرضت مجموعة من النباتات تحلّ محلها فوراً مجموعة أخرى من الحياة النباتية قد تبدو شبيهة بالفصيلة المنقرضة شبهاً كبيراً. وفي أعماق أنسجة هاتين المجموعتين من النباتات ستكون عمليات البناء الضوئي مختلفة جذرياً. وبعد هذا التبديل سوف تستمرّ الحياة على الأرض على صورة ربما لا تختلف كثيراً عما كان معتاداً في السابق، على الأقلّ لفترة من الزمن.

وهناك احتمال مفاده أن النباتات سوف تستمرّ بتطوير مسارات بناء ضوئي أخرى لتعويض انخفاض مستويات ثاني أكسيد الكربون. وفي هذه الحالة قد تبقى بعض أشكال النباتات على قيد الحياة في ظروف مستويات ثاني أكسيد الكربون المنخفضة. وفي نهاية المطاف سيكون مصير هذه المعاقل الأخيرة هو الانقراض أيضاً. وتوحي جميع النماذج أن ثاني أكسيد الكربون سوف يستمرّ بالهبوط حجما ليصل في الأخير إلى المستوى الحرج، وهو 10 أجزاء في المليون.

وتتعلق جميع الأسئلة المهمة حول التطور المستقبلي بمستقبل التنوع الحيوي، أي عدد الأنواع على الأرض. والسؤالان اللذان يُثاران هنا هما: هل سيكون عدد الأنواع أكثر مما هو عليه الآن؟ حتى وإن كان كذلك، فخلال أي مدة زمنية؟ لكن الإجابة عن هذه الأسئلة تحتاج، كما هو الأمر في أحيان كثيرة، إلى نظرة نحو الماضي.

إن الأذى الناجم عن انخفاض ثاني أكسيد الكربون لن يقتصر على النبات على اليابسة بل يتعداه إلى النباتات البحرية الكبيرة وربما العوالق أيضاً. ومن ثم ستتأثر المجتمعات البحرية بشدة لأن أساس أغلب المجتمعات البحرية هو العوالق النباتية، أي النباتات وحيدة الخلية التي تطفو في البحار. وسيؤثر انخفاض ثاني أكسيد الكربون بشدة عليها، مثلما يؤثر في النباتات البرية. ولكن اختفاء النباتات البرية سوف يسبب أيضاً هبوطاً مفاجئاً في الكتلة الحيوية للعوالق البحرية حتى ولو لم نأخذ بالحسبان تأثيرات ثاني أكسيد الكربون على حجم النباتات في البحار.

العوالق النباتية البحرية تعاني نقصاً شديداً في المغذيات في أغلب الظروف البحرية، ويؤدي تدفق النترات والحديد والفوسفات إلى المحيطات في كل موسم إلى ازدهار العوالق النباتية. ولكن مصدر هذه الفوسفات والنترات هو النباتات البرية المتفسخة المحمولة إلى المحيطات بواسطة تيارات المياه السطحية من اليابسة. ومع تناقص حجم النباتات سيتناقص حجم المغذيات، فتعاني المحيطات مجاعةً المغذيات فيهبط حجم العوالق هبوطاً كارثياً. وهذه النزعة الهابطة لن تنعكس أبداً، حتى ولو مرت النباتات البرية بنهضة أخرى على مستوى منخفض لأن - كما أشرنا سابقا - هذه النباتات لن تصل أبداً إلى كتلة المادة الحية العظيمة التي وصلت إليها في عالم لا يعاني مجاعةً ثاني أكسيد الكربون.

وستختفي أسس السلاسل الغذائية كما نعرفها اليوم على اليابسة وفي البحر. وسيؤدي اختفاء النباتات إلى انخفاض حادّ في الإنتاجية العالمية، وهي مقياس لكمية الحياة على كوكبنا. فالحياة ستبقى: كتلٌ هائلة من البكتيريا، مثل البكتيريا الزرقاء، سوف تستمر في الحياة لأن هذه الكائنات قادرة على التحمل وتستطيع أن تعيش في مستويات ثاني أكسيد الكربون أقلّ من تلك الضرورية لاستمرار حياة النباتات متعددة الخلايا، كما أنها لا تحتاج إلى أكسجين بخلاف النباتات متعددة الخلايا.

وسيؤثر اختفاء النباتات تأثيراً عظيماً في تضاريس الأرض وطبيعة سطحها. وعندما تختفي الجذور وتصبح الطبقات السطحية أقلّ استقراراً ستتغير طبيعة الأنهار. وتعود الأنهار الكبرى المتعرجة للعصر الحديث إلى العصر السيلوري على الأكثر، أي إنها لم تظهر إلا منذ نحو 400 مليون سنة عندما استعمرت النباتات البرية اليابسة لأول مرة؛ لأن المحافظة على ضفاف الأنهار المتعرجة يحتاج إلى تثبيت الأرض بالجذور. وعندما تنقرض النباتات أو لا تكون موجودة بسبب شدة الانحدار أو التربة غير المناسبة أو

ظروف بيئية غير مؤاتية أخرى تكون طبيعة الأنهار مختلفة: أنهار أو جداول متعددة الفروع وأشكال التدفق المشاهدة في المراوح الطميية الصحراوية أو أمام الثلاجات الجليدية، وهما البيئتان غير الداعمتين للحياة النباتية ذات الجذور. فقد كانت هذه طبيعة الأنهار قبل ظهور نباتات اليابسة وستكون طبيعتها مرة أخرى بعد أن يهبط ثاني أكسيد الكربون دون عتبة انقراض النباتات.

ولن يكون فقدان التربة أقلّ دراماتيكية، فعندما تحمل الرياح التربة بعيداً تترك وراءها سطوحاً صخرية جرداء. وعندما ستبدأ هذه الحالة بالحدوث على سطح الكوكب سيغير الألبيدو Albedo وقدرة الأرض على عكس الضوء. وسينعكس ضوء أكثر بكثير إلى الفضاء؛ مما يؤثر في التوازن الحراري للأرض، وسيتغير الغلاف الجوي وأنماط نقل الحرارة والهطولات تغيراً جذرياً. وستحمل الرياح العاصفة حبيبات الرمل المتشكلة نتيجة الحرارة والبرد والمياه الجارية على الأسطح الصخرية. وبينما تقل التجوية الكيميائية بسبب فقد التربة، ستتزايد هذه التجوية الميكانيكية؛ فتُراكم حجماً ضخماً من الرمال؛ فيتحول سطح كوكبنا إلى سلاسل عملاقة من حقول الكثبان الرملية.

ومع أن هذا الحدث قد يطلق الانقراض النهائي لكل الحياة النباتية على اليابسة (وربما في البحار أيضاً)، فإن من المرجح أكثر أن تتبع فترة زمنية طويلة (تقاس بمئات الملايين من السنين) تبقى مستويات ثاني أكسيد الكربون خلالها حول المستوى الذي يؤدي إلى موت النباتات. ومع هبوط المستويات إلى الحدود المميتة ستنقرض النباتات فتنخفض التجوية؛ مما يسمح بتراكم ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي مرة أخرى، وهذا سيتيح لبعض البذور والجذور النموَّ وربما الازدهار، حتى ولو استمرّ هذا لبضعة آلاف سنة وبأعداد زهيدة. ومع انتشار الحياة النباتية فوق سطح الأرض مرة أخرى تعود سرعات التجوية إلى الازدياد؛ فتزداد سرعة امتصاص ثاني أكسيد الكربون من الغلاف الجوي.

وتعتمد الحياة الحيوانية على الأكسجين في الجو، إذ لا يكاد يوجد هناك أي حيوان يستطيع أن يعيش في ظروف انعدام الأكسجين ولا حتى في ظروف قلة الأكسجين (مع أنه أكتشف وجود حيوان لافقاري صغير يعيش بلا أكسجين في أعماق البحر الأبيض المتوسط). وقد قال ديفيد سي. كاتلينغ David C. Catling، من جامعة واشنطن، إن بعد مرور نحو 15 مليون سنة عقب موت النباتات سيكون تركيز الأكسجين في الغلاف الجوي أقلّ من واحدٍ في المئة، مقابل تركيز قدره 21 في المئة الموجود في الغلاف الجوي للأرض حاليا.

التطور المستقبلي للبشر

الحياة نفسها هي من أهمّ عوامل تطور الحياة وانقراضها. وتستند فرضية ميديا Medea hypothesis [ميديا في الأساطير الأغريقية تقتل أولادها] للمؤلف المشارك وورد إلى استنتاج مفاده أن الحياة كانت في الغالب عدواً لنفسها أكثر من كونها صديقة لنفسها؛ وأن شتى النظم الإيكولوجية والأنواع المكونة لها لا تكون أكثر تلاؤماً ونجاحاً بازدياد عمرها. فكما رأينا، كانت العوامل القاتلة خلال الانقراضات الجماعية الكبرى ناجمة عن شتى السموم التي تنتجها الحياة الميكروبية. ولهذا نرى من المناسب أن نختتم كتابنا ببعض الملاحظات حول أكثر الأنواع «ميديانيةً» عبر التاريخ، وهو نوعنا نحن. فماذا سيكون مستقبل تطور نوعنا؟

الصورة النمطية لتطور نوعنا في كتب الخيال العلمي هي الزيادة في حجم الرأس الذي يحوي دماغاً أكبر بكثير ويتصف بالجبين العالي والعقل الراقي. ولكن ربما لا يكون الدماغ الضخم جزءاً من مستقبل البشرية؛ إذ يبيّن السجلّ الأحفوري أن أيام الازدياد السريع في حجم الدماغ قد مضت على ما يبدو، على الأقل بناء على قياس حجم الجماجم على مدى بضعة آلاف الأخيرة من الأجيال. ومن المستبعد أن تتكرر تلك الظروف التي سببت زيادة حجم الدماغ (والتي يفترض أنها كانت مناخية بالدرجة الأولى). فما الذي يخفيه التطور للبشرية إن لم يكن الدماغ العملاق؟ والسؤال المثير الآخر هو ما إذا كانت البشرية قد خضعت لأي تطور مهم منذ تشكلها قبل نحو مئتي ألف سنة.

الاكتشاف المفاجئ بناءً على الدراسات الوراثية هو أن الجينوم البشري قد خضع لتعديلات كبرى منذ تشكل النوع قبل نحو مئتي ألف سنة. وإضافة إلى ذلك، يبدو أن سرعة التطور البشري تزايدت خلال ثلاثين ألف سنة الماضية. وتوحي نتائج دراسة هنري هاربندينغ وجون هوكس أنه خلال خمسة آلاف سنة الماضية وحدها تطور الناس أسرع بمئة مرة من أي وقت مضى منذ انفصال الهومينيد الأوائل عن أسلاف الشمبانزي المعاصر قبل نحو ستة ملايين سنة. وفضلاً عن ذلك، لم يشاهَد انخفاض في تطور تلك المميزات التي تستخدم مجتمعةً للتمييز بين الأعراق البشرية، بل إن الأعراق البشرية بقيت حتى وقت قريب تتباعد عن بعضها، ولم تبدأ هذه النزعة بالتباطؤ إلا في القرن الماضي من خلال الثورة في تنقلات الإنسان وتغيير المواقف السلوكية لأغلب الناس نحو الانفتاح، وهناك سببان رئيسان: الزراعة والمدن، أي الغذاء والاكتظاظ.

ويبدو مما سبق أن البشر تطوريون من الدرجة الأولى، أو على الأقلّ كانوا كذلك حتى آخر وقت. ويمكن انطلاقاً من هذا التكهن حول ما يحمله المستقبل للنوع البشري من حيث التغيرات التطورية القادمة بافتراض أن عمر النوع بضعة ملايين سنة، وهو العمر المتوسط لأي نوع من أنواع الثدييات. ولأن كثيراً من التغيرات التطورية في الخمسة آلاف سنة الماضية كان يشمل التلاؤم مع بيئات محددة، فمن المنطقي أن نسأل: كيف يمكن أن يؤثر عالم المستقبل - إن كان له أي تأثير أساساً - في الحصيلة التطورية لنوعنا؟ هذا مع توقع أعداد سكان أكبر مما نراه اليوم ومدن أضخم وحقول زراعية أوسع عدا العواقب الأخرى للتطور التكنولوجي. وهناك أسئلة كثيرة: هل سيكون الناس أكبر أم أصغر، هل سيكسبون العقل أم يخسرونه، هل سيكونون عقلانيين أم انفعاليين؟ هل سيكون الناس أكثر أم أقلّ تحملاً للمشكلات البيئية القادمة مثل قلة المياه العذبة وكثرة الإشعاع فوق البنفسجي وزيادة درجات حرارة العالم؟ هل سينتج من البشر نوع جديد أم أن نوعنا عقيم تطورياً؟ هل يمكن أن يكون تطور البشرية في المستقبل ليس ضمن جينات البشر بل من خلال إضافة التعبير بالسيليكون وتعزيز الذاكرة في الأدمغة البشرية من خلال الاتصالات العصبية مع أجهزة غير عضوية؟ هل البشرية ليست إلا بانياً للعقل الذي سوف يسود الأرض في المستقبل، وهو عقل الآلات؟

نهاية التاريخ

هناك عزاء لمن يخشون أن «النهاية قريبة»، وحتى لمن يعتقدون أنّ الحياة على كوكبنا على وشك انقراض جماعي جديد أو قد دخلت فيه بالفعل. ويبدو أننا في ذروة أعداد الأنواع خلال كامل تاريخ الحياة الذي يستمرّ 3.4 بليون سنة (على الأقلّ). وفي رأينا، لا يمكن حالياً إثبات النسبة المئوية للحياة الخاضعة للانقراض، والذي يقسم إلى انقراض كبير (أكثر من 50 في المئة) أو صغير (بين 10 و50 في المئة) أو ليس انقراضاً أصلاً، ولا يمكن حساب هذه النسبة دون معرفة مقام الكسر. ومن الواضح أن عدد الأنواع على الأرض يتجاوز 1.6 مليون. وإذا تحدد أن انقراضاً جماعياً جديداً يجري الآن، فهناك بعض العزاء في معرفة أن التنوع الحيوي كان يقفز بعد الانقراضات الجماعية الماضية إلى مستويات أعلى مما كانت عليه قبل للانقراض.

كانت تلك حجة فرانك دريك Frank Drake العظيم في نقاشه مع واحد من مؤلفي هذا الكتاب منذ سنين، وكان موضوع هذا النقاش ما إذا كانت الكواكب الشبيهة بالأرض نادرة أم لا. وصاحب صيغة دريك، المُسماة على اسمه والمستخدمة لتقدير عدد الأنواع الذكية الأخرى في مجرتنا، يرى أن الانقراض الجماعي الهائل، مثل الانقراض البرمي، عملية مفيدة في الواقع في أي كوكب. ولكن ثمن مثل هذه الانقراضات باهظ، إذ لم يصل التنوع الحيوي بعد الانقراض البرمي إلى المستويات قبل الانقراض إلا بعد ما بين 5 و10 ملايين سنة. فقد عاد العالم إلى دهر الطلائع من حيث التنوع الحيوي بل حتى من حيث أنماط الحياة، وهو الوضع الذي وصفناه في مكان آخر من باب المزاح، حتى ولو أن المزاح كان جزيئياً، بعبارة «الإمبراطورية تردّ الضربة»، وفي هذه الحالة المقصود هو إمبراطورية الميكروبات اللاهوائية السامة من ما قبل الكامبري.

النبوءة الأخيرة لفرضية ميديا التي طرحها وورد هي أنها تنطبق على أي كوكب تسود فيه حياة، ولا يوجد إلا مخرج واحد من قمرة الانتحار التي تخلقها الحياة من خلال كينونتها عينها، وهذا المخرج هو العقل الذي يسمح برؤية المستقبل. واحد من احتمالات المستقبل هو أن نوعنا سوف يمدّ موئله إلى المريخ أولاً ثم إلى أحزمة الكويكبات وأخيراً إلى النجوم الأخرى. ومستقبل آخر هو أن ثاني أكسيد الكربون الذي نضخه في الغلاف الجوي سيؤدي إلى ذوبان جميع الجليد على سطح الأرض وارتفاع منسوب البحر وتباطؤ أنماط الدورة الحرارية الملحية، مؤدياً إلى الركود يتبعه انعدام الأكسجين في قيعان المحيطات أولاً ثم في أعماق أقلّ وصولاً إلى المياه السطحية، مع تحرر تراكيز سامة من كبريتيد الهيدروجين من جميع المحيطات في الوقت نفسه. وفي مثل هذا المستقبل لن تنجو إلا حيوانات ذات أقنعة واقية جيدة.

إن التاريخ هو نظام إنذار مبكر.

كلمة أخيرة

لا شيء يدوم، وهذا ينطبق على الكواكب والكائنات والمسيرات المهنية في مجال العلوم. ومع أن الجنازات هي من بين الأحداث المحزنة التي نشارك فيها نحن البشر، فإنها على الأقل لحظات حاسمة تشير إلى التغيير، التغيير من الحياة إلى الموت. ولكن ما قد يكون محزناً أكثر من الجنازة هو الحياة وقد شارفت على الانتهاء، كالإنسان المصاب

بمرض عضال وكأنه حكمٌ بالموت غير قابل للطعن. فهذه هي حالة النوتيولوس، الحيوان الذي استعرضناه في هذا الكتاب كخير مثال على الأمونيت المنقرض، وهو الحيوان الذي تفادى الانقراضات الجماعية الكبرى بصفته إحدى الرتب التصنيفية الكبرى، حتى ولو أنه لم يحافظ تماماً على شكله القديم. وقد ظهرت النوتيوليدات أول مرة خلال الانفجار الكامبري منذ 500 مليون سنة، ولا تزال موجودة، إلا أن أعدادها تتناقص، وصارت اليوم على حافة الانقراض في مختلف بلدان المحيط الهادي بسبب الطلب على قواقعها؛ فالانقراضات الجماعية الماضية لم تكن تبيد الكائنات بناء على جمالها. أما الانقراض الجماعي الذي يحرضه الإنسان؛ فآليته مختلفة عما سبقه من الانقراضات.

لكن حتى قبل أن يكون النوتيولوس سلعة تجارية، إذ شُحن نصف مليون من قواقعه إلى الولايات المتحدة خلال السنوات الخمس بين 2005 و2010 وحدها، فإنه كان قد تلقى الحكم بالموت. وتطور مخطط جسم النوتيولوس ليعيش في مياه دافئة ضحلة. إنه يستعمل مضخة تناضحية Osmotic لتفريغ حجرات قوقعته من السائل الذي تكون مملوءة به خلال تشكلها؛ وقد تطور النوتيولوس لتنمو قوقعته في مياه بحرية سطحية غنية بالكالسيوم. وقد جاءت الثورة البحرية في الحقبة الوسطى التي لخصناها في مكان سابق من هذا الكتاب. فقد كانت النوتيولوسات سابقاً حصينة بقواقعها الخارجية القاسية حتى تطورت أنواع جديدة من الأسماك خلال الطباشيري ولاحقاً تستطيع كسر القوقعة الخارجية للنوتيولوس بسهولة. فصارت الحياة في المياه السطحية مستحيلة: صارت المياه السطحية حكماً بالموت.

الحياة هي التغيير. وتعامل النوتيولوس مع هذه الضغوط التطورية و الإيكولوجية الجديدة على مرّ الملايين من السنين بالانتقال الثابت البطيء إلى الحياة في مياه أعمق فأعمق. وتشير نتائجنا الجديدة إلى أنها كانت تعيش في أعماق متوسطها بين مئتي وثلاثمئة متر، لكن تصميمها غير متلائم تلاؤماً جيداً للعيش في مثل هذه الأعماق. وصار نموها أبطأ، إذ كانت تحتاج إلى سنة لتصل إلى حجمها الأقصى، أما الآن فصارت تحتاج إلى عشر أو خمس عشرة سنة، وتعيش الآن حياة كائن أعماق البحار، وأعدادها قليلة وبيئتها مظلمة قليلة الموارد وقد توصف بأنها بيئة صعبة على أقلّ تقدير. والكائنات المفترسة تتبعها إلى الأعماق أيضاً. ولا يستطيع النوتيولوس التوسع إلى مناطق أعمق لأن لقوقعته حدّ عمق معيناً تبعج بعده بفعل ضغط الماء؛ ما يؤدي إلى موته فوراً، أي إنه لم يعد لديه ملجأ آمن يختبئ فيه.

إن مصير النوتيولوس كناية عن مصير الحياة الحيوانية كلها. فمع مرور الوقت، وبفعل التطور والتنافس والتغيرات الطبيعية في أرضنا وشمسنا بتقدم عمرهما، سيكون مخطط جسم أي كائن غير ملائم للظروف الجديدة. وفيما يتعلق بنا نحن حيوانات اليابسة، لن تَبيد بسبب الحيوانات المفترسة بل بفعل زيادة حجم الشمس وانخفاض تراكيز ثاني أكسيد الكربون، ولن يعود على الأرض مكان صالح للعيش. والأمل الوحيد لنوعنا إذا أردنا أن نفعل ما فعله النوتيولوس الذي بلغ عمره نصف بليون سنة، أو الأفضل ما فعلته البكتيريا الزرقاء التي تعيش منذ بليوني إلى ثلاثة بلايين سنة، هو أن نهاجر. وكان الفصل الأخير هنا عن تاريخ الحياة على الأرض تحديداً، ولكن يمكن كتابة كتاب جديد تماماً، وفي الواقع مكتبة كاملة من الكتب.

ربما بدأت الحياة على المريخ، شكل الحياة الذي نعرفه. وكان الخيار إما الهجرة من المريخ أو الموت، فالسعي إلى البقاء بمعناه المباشر مُسجَّل حرفياً في جيناتنا.

الملاحظات

مقدمة

1. J. Loewen, Lies My Teacher *Told Me: Everything Your American History Textbook Got Wrong (New York: Touchstone* Press, 2008).
2. J. Baldwin, *Notes of a Native Son* (Boston: Beacon Press, 1955).
3. N. Cousins, *Saturday Review*, April 15, 1978.
4. P. Ward, "Impact from the Deep". *Scientific American* (October 2006).
   إن الاستعمال الفعلي الأول لمصطلح «الانقراض الجماعي بغازات الدفيئة» يصعب إيجاده، مع أنني استخدمته صراحةً في مقالة في مجلة Discover في تسعينات القرن العشرين.
5. G. Santayana, The Life of Reason, Five Volumes in One (1905).
6. كان كتاب فورتي، ولا يزال، من أعظم الروائع، وذلك ليس بفضل «الحقائق» فحسب بل بفضل أسلوب تقديمه لقصص العلوم، ما يتحول في أيدٍ أقل مهارةً إلى تاريخ جاف. ومع ذلك، صار قديماً الآن (ولا عجب باعتبار كثرة الأبحاث الجديدة، بما فيها تلك التي أجراها رينشارد نفسه). فقد استخدمنا هذا الكتاب كذريعة أو فزاعة، ونرجو أن نكون معذورين في هذا. ونقول للمبتدئين إننا نسمح باستثناءٍ لعنوان الكتاب، فبينما كان زمن بلوغ عمر الحياة على الأرض أربعة بلايين سنة فرضيةً معقولة في منتصف تسعينات القرن العشرين، أي وقت تأليف الكتاب، فربما لا يكون كذلك في أيامنا. ربما لا يزال المؤلف محقاً في هذا، لكننا سنطرح حججنا لاحقاً. مرجع الكتاب هو:
   R. Fortey, Life: *A Natural History of the First Four Billion Years of Life on Earth* (New York: Random House, 1997).
7. تجدون قراءةً عظيمة حول هذه الناحية من فلسفة أولئك الذين أسسوا أفكارهم على مجال الجيولوجيا الذي كان في بدايات نشأته حينذاك (وكذلك مجالها الفرعي علم الأحافير) في كتاب:
   M. J. Rudwick, The Meaning of Fossils: Episodes in the History of Palaentology (London: Science History Publications, 1972).
   كان يصعب الحصول على هذا الكتاب بعد نشره مباشرةً، لكن أعيد نشره لاحقاً في دور نشر أكثر إتاحةً. إن مناقشة ردويك لنهاية القرن الثامن عشر وبداية القرن التاسع عشر، عندما كان الجدال حول الزمن الجيولوجي والعمليات الجيولوجية يتقاطع مع الأفكار الباكرة حول مجالات طبقات الأحافير والأفكار الباكرة حول التطور، مناقشة أصيلة ومؤثرة، وهي واجبة القراءة على كل مهتم بالزمن والتاريخ الطبيعي.
8. نقول لطلابنا في الجامعة إن تشارلز داروين كان جيولوجياً قبل كل شيء آخر. إن فهمه للسجل الأحفوري فضلاً عن شتى أنواع الأحافير التي رآها كلما نزل عن تلك السفينة الصغيرة بيغل (وكان ينزل عنها كلما أمكن لأنه كان يعاني من دوار البحر) كان أساسياً في تحضير عقله للمشاهدات التي أدت إلى فرضياته الشهيرة حول التطور. كتاب جيد حول هذا التعليم هو: A. Desmond, *Darwin* (New York: Warner Books, 1992.
9. M. Rudwick, *Georges Cuvier, Fossil Bones and Geological Catastrohes: New Translations and Interpretations of the Primary Texts* (University of Chicago Press, 1997).
10. هناك أعمال كثيرة حول عدد الأنواع عبر الزمن، وسوف نناقش هذا تفصيلاً في صفحات مقبلة. ومن أحدث الأعمال عمل جون ألروي وحشد من المؤلفين:
    John Alroy *et al.*, Phanerozoic Trends in Global Diversity of Marine Invertebrates. Science, 321 (2008): 97.
11. N. Lane, *The Vital Question: Why is Life the Way it is?* (London: Profile Books, 2015); *Life Ascending: The Ten Great Inventions of Evolution* (London: Profile Books, 2009); Power, Sex, Suicide: Mitochondria and the Meaning of Life (Oxford: Oxford University Press, 2005); *Oxygen: The Molecule That Made the World* (Oxford: Oxford University Press, 2002).

1. معرفة الوقت

1. هناك دليل جيد حول استخدام علم الطبقات (الستراتيغرافيا) من اللجنة الفرعية الدولية للستراتيغرافيا. إنها مجموعة شكلية جداً تقلق وتسهر على كل مصطلح وتسمية. ولديها موقع على الإنترنت، وأحد الفصول المفيدة (بالإنجليزية) موجود على العنوان stratigraphy.org/upload/bak/defs.htm
2. باختصار: شتى وسائل تأريخ العمر: يستخدم كل من التأريخ بنظائر اليورانيوم والبوتاسيوم مع الأرغون واليورانيوم مع الرصاص والسترونشيوم ودراسة مغناطيسية طبقات الأرض. ونوصي لمن يريد أن يفهم كل هذا بقراءة أعمال مارتين ردويك، وجميعها متوفرة في المكتبات ومتاجر الكتب في الإنترنت. وبينها أحدث مؤلفاته:
   M. Rudwick, *Earth's Deep History: How It Was Discovered and Why It Matters* (Chicago: University of Chicago Press, 2014).

د. سلام العبلاني

مدير إدارة الثقافة العلمية

التحرير

د. ليلى الموسوي

محمد الحسن

عبدالله المهنا

مراجعة المصطلحات

نواف المطيري

تامر صلاح الدين

التدقيق اللغوي

فادي بدارنة

جرافيك وتنضيد

خالد كلارجي

سكينة عبدالصمد

المتابعة والتنسيق

دانيا حداد



شركة التقدم العلمي للنشر والتوزيع

www.aspdkw.com



مؤسسة الكويت للتقدم العلمي

Kuwait Foundation for the Advancement of Sciences

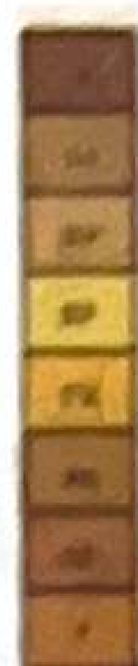
www.kfas.org

مازالت نظريات تشارلز داروين، المنشورة أول مرة قبل أكثر من قرن ونصف، تمثل النموذج الإرشادي لكيفية فهم تطور الحياة - لكن التطورات العلمية الأخيرة غيرت ذلك. ينطلق اليوم عالمان بارزان من حصيلة سنوات من البحث في البيولوجيا، والكيمياء، وعلم الفلك البيولوجي وعلم المستحاثات لتقديم حكاية فيها تبصرة مقتبسة من أفكار ونتائج بحثية جديدة. كل ذلك كتب بأسلوب مرح ومفعم بالحيوية والوضوح، مبينا بأن الكثير من اعتقاداتنا الراسخة عن تاريخ الحياة خاطئة.

"نموذج مذهل على الكتابة الواضحة." - ساينتفيك أمريكان

"فرضيات رهيبة وجديدة" - ليبرتي جورنال

"منظور متوازن وقيم." - ساينس









شركة التقدم العلمي للنشر والتوزيع

Shop.aspdkw.com